

Trabajo Fin de Grado

Cálculo de trayectorias por el método de Fast Marching para
vehículos marítimos de superficie

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

CURSO 2018/19



Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Autor: Borja Barrios Blaya

Tutor en la universidad: Luis Santiago Garrido Bullón

Leganés, junio 2019

RESUMEN

En el presente trabajo se buscará avanzar en el campo de investigación de la planificación de trayectorias. Para ello, se procederá a exponer varios tipos de algoritmos que desembocan en el algoritmo principal del trabajo, el método de Fast Marching. Este método, junto a sus evoluciones (Fast Marching Square) y (Fast Marching Star), son algoritmos muy equilibrados que proporcionan unos resultados precisos en una baja cantidad de tiempo, lo que los hace algoritmos ideales para cumplir con este cometido.

Este algoritmo simulará el sistema de navegación de un USV (Unmanned Surface Vehicles), que son vehículos autónomos que requieren de un método de planificación de trayectorias óptimo para no sufrir accidentes ni inconvenientes en sus rutas.

El Fast Marching será utilizado en diferentes ejemplos proporcionando resultados satisfactorios en forma de trayectoria. Estas trayectorias se verán afectadas por diferentes campos vectoriales, que harán que se vean modificadas dependiendo de la dirección que posean, simulando el efecto que las corrientes marinas tendrían sobre el vehículo. A su vez, estos campos vectoriales se verán representados por vectores de corriente los cuales indicarán la dirección y sentido de los campos, otorgando así, resultados específicos para esas direcciones de los campos y más aproximados a la realidad.

Palabras clave: Fast Marching, USV (Unmanned Surface Vehicles), vector de corriente, campo vectorial, trayectoria.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a cada uno de los profesores que han hecho posible que pueda finalizar este grado de manera satisfactoria. En especial a mi tutor de TFG, Luis Santiago, que me ha guiado y ayudado a desarrollar este proyecto de forma óptima.

Agradecer a mi familia la confianza que han depositado en mi desde el primer momento durante estos cinco años, nunca perdiéndola, aunque las situaciones fueran adversas, especialmente a mis padres, Alma y Juanjo.

Agradecer a mis amigos de la Universidad por tantos buenos momentos juntos, que han hecho de esta experiencia universitaria un cúmulo de momentos inolvidables. Mención especial a María y la Squadra, cuyo apoyo y confianza ha sido indispensable para conseguir sacar esta etapa adelante.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación y contexto del proyecto.....	1
1.2 Objetivos.....	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1 Estado del arte de los USV.....	3
2.2 Estado del arte de los algoritmos de cálculo de trayectorias.....	7
3. MARCO REGULADOR.....	12
4. MÉTODO DE FAST MARCHING: EVOLUCIÓN Y DESARROLLO.....	15
4.1 Fast Marching.....	15
4.2 Fast Marching Square.....	19
4.3 Fast Marching Star.....	20
4.4 Decisión del algoritmo utilizado para este trabajo.....	21
5. APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
5.1 Fast Marching aplicado a casos sencillos.....	22
5.2 Fast Marching aplicado a casos con corrientes marítimas.....	26
5.3 Fast Marching con vectores de corriente.....	35
5.3.1 Estrecho de Gibraltar.....	36
5.3.2 Mar Mediterráneo.....	38
5.3.3 Madagascar.....	41
5.3.4 Golfo de México.....	43
5.3.5 Escandinavia.....	46
6. CONCLUSIÓN.....	50
7. POSIBLES PUNTOS DE ESTUDIO PARA PRÓXIMOS TRABAJOS	51
8. ENTORNO SOCIECONÓMICO.....	53
9. BIBLIOGRAFÍA.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. USV utilizado en misiones militares.....	4
Fig. 2.2. USV emplazado en el océano recogiendo energía eólica y solar gracias a las placas fotovoltaicas y la hélice que lleva incorporada.....	4
Fig. 2.3. USV utilizado en tareas de investigación.....	5
Fig. 2.4. USV encargado de registrar los cambios en las corrientes y profundidades de los mares	5
Fig. 2.5. USV encargado de labores de rescate	6
Fig. 4.1. Imagen que representa la variación del índice de refracción de la luz a la hora de incidir en distintos medios.....	16
Fig. 4.2. Representación gráfica de la expansión de la onda del método de Fast Marching.....	18
Fig. 4.3. Representación de un cálculo de trayectoria realizado por el método de Fast Marching.....	18
Fig. 5.1. Representación de la trayectoria calculada en una habitación vacía.....	22
Fig. 5.2. Representación de la expansión de la onda en la habitación vacía.....	23
Fig. 5.3. Representación de la trayectoria calculada en una habitación vacía afectada por un campo vectorial.....	23
Fig. 5.4. Representación de la expansión de la onda en la habitación vacía aplicándole un campo vectorial.....	24
Fig. 5.5. Representación de la trayectoria calculada en una habitación con obstáculos.....	25
Fig. 5.6. Representación de la expansión de la onda en una habitación con obstáculos.....	25
Fig. 5.7. Representación de la trayectoria calculada en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección suroeste.....	25
Fig. 5.8. Representación de la expansión de la onda en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección suroeste.....	25
Fig. 5.9. Representación de la trayectoria calculada en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección noreste.....	26
Fig. 5.10. Representación de la expansión de la onda en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección noreste.....	26
Fig. 5.11. Representación de la dirección y el módulo de las corrientes marinas el día 5 de junio. Imagen extraída de la web State of the Ocean.....	28
Fig. 5.12. Representación de la trayectoria sometida a la corriente de Bora.....	29

Fig. 5.13. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany sin campos vectoriales aplicados.....	30
Fig. 5.14. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany sometida al efecto de la pleamar.....	30
Fig. 5.15. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany sometida al efecto de la bajamar.....	31
Fig. 5.16. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany aplicándole un campo vectorial orientado hacia la derecha en el punto superior.....	32
Fig. 5.17. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany aplicándole un campo vectorial orientado hacia la izquierda en el punto superior.....	32
Fig. 5.18. Representación de la trayectoria obtenida en la costa de Sidney sometida a un campo vectorial con dirección norte de bajo módulo.....	32
Fig. 5.19. Representación de la trayectoria obtenida en la costa de Sidney sometida a un campo vectorial con dirección norte de alto módulo.....	33
Fig. 5.20. Representación de las líneas de corriente en la zona del Mar de Tasmania. Imagen extraída de la web State of the Ocean.....	34
Fig. 5.21. Representación de la trayectoria obtenida en la costa de Sidney sometida a un campo vectorial de dirección suroeste.....	35
Fig. 5.22. Representación de la trayectoria obtenida en el Estrecho de Gibraltar aplicando el campo vectorial de Google Earth.....	37
Fig. 5.23. Representación de la trayectoria obtenida en el Estrecho de Gibraltar aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean.....	38
Fig. 5.24. Representación de la trayectoria obtenida en el Mar Mediterráneo aplicando el campo vectorial de Google Earth.....	39
Fig. 5.25. Representación de la trayectoria obtenida en el Mar Mediterráneo aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean.....	40
Fig. 5.26. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Madagascar aplicando el campo vectorial de Google Earth.....	41
Fig. 5.27. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Madagascar aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean.....	42
Fig. 5.28. Representación de la trayectoria obtenida en el Golfo de México aplicando el campo vectorial de Google Earth.....	44
Fig. 5.29. Representación de la trayectoria obtenida en el Golfo de México aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean.....	45

Fig. 5.30. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial de Google Earth.....	46
Fig. 5.31. Ampliación de la imagen que muestra la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial de Google Earth.....	47
Fig. 5.32. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean.....	48
Fig. 5.33. Ampliación de la imagen que muestra la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.1 Costes de personal.....	53
Tabla 8.2 Costes de recursos.....	53
Tabla 8.3 Costes totales.....	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y contexto del proyecto

El presente Trabajo de Fin de Grado surge de mi interés en la especialidad de Control y Automática. Este campo es considerado uno de los campos de investigación con más futuro, dado que el mundo se encuentra actualmente en plena expansión tecnológica.

Dentro de la especialización de Control y Automática existen numerosas variantes donde poder investigar, pero destacó por encima del resto la opción de poder planificar y comprender como funcionaban las trayectorias que seguían los robots y vehículos cuando se enfrentaban a terrenos inexplorados como una misión en Marte.

Es por ello, por lo que decidí aceptar este proyecto, el cual ya había sido realizado anteriormente por otro alumno, pero era posible avanzar con la investigación.

El fin de este proyecto nace de la necesidad de planificar trayectorias para vehículos no tripulados que puedan adecuarse a la realidad, a partir del algoritmo de Fast Marching. Además, para que este proyecto pueda tener un perfil más realista, se le añadirán campos vectoriales al algoritmo, que simularán las corrientes marinas.

Es sabido, que en los océanos las trayectorias de las embarcaciones se ven afectadas por la fuerza de las mareas y las corrientes, las cuales variarán dependiendo de diferentes factores. En este caso, al tratarse de vehículos sin tripulación, el timón no se podrá ir variando constantemente como ocurriría en una embarcación tripulada normal, sino que se necesitará de una planificación previa, la cual conociendo la dirección y la fuerza de las corrientes proporcione una trayectoria segura y viable para que el vehículo no tripulado pueda recorrerla sin problemas.

1.2 Objetivos

Durante este trabajo se buscará analizar de una manera clara y sencilla la evolución y el alcance que puede llegar a tener el algoritmo de Fast Marching. Para ello, se llevará a cabo un análisis de los diferentes algoritmos que han aportado o han sido más

significativos en el campo del cálculo de trayectorias, para finalmente realizar la investigación con el ya citado método de Fast Marching.

Además, en el presente proyecto, se buscará informar de los USV o Unmanned Surface Vehicles, que son los vehículos bajo los que gira el trabajo. Este tipo de embarcaciones se encuentran aún en pleno desarrollo, aunque ya están siendo implementadas con múltiples usos. Aun así, su situación legal es todavía una incógnita, por lo que se analizarán las leyes bajo las que se encuadran.

Finalmente, se llevará a cabo un estudio de la influencia que tienen las corrientes marinas en las trayectorias que seguirán los USV. Para ello, se utilizará el algoritmo de Fast Marching, el cual calculará la trayectoria resultante, mientras es sometido a la acción de un campo vectorial que imitará la fuerza de las corrientes marinas. En este estudio, además, se añadirá la presencia de vectores de corriente, que indicarán la dirección que llevan las corrientes marinas, lo cual es clave a la hora de poder calcular la trayectoria definitiva. Para ello, se extraerán diferentes emplazamientos reales de Google Earth y de la web State of the Ocean, a los que se le aplicarán los campos vectoriales pertinentes, obteniendo así una serie de resultados que se aproximan considerablemente a la realidad.

2. ESTADO DEL ARTE

Este trabajo se basa en la planificación o cálculo de trayectorias para vehículos de superficie marítimos mediante el algoritmo de Fast Marching.

En este apartado de Estado del arte, se procederá a evaluar primeramente la evolución de los USV (Unmanned Surface Vehicles) que se han ido desarrollando, para posteriormente dar paso al análisis de los diferentes algoritmos más importantes que se han creado para el cálculo de trayectorias.

2.1 Estado del arte de los USV

Los USV o Vehículos de Superficie No Tripulados, son vehículos que se desplazan por la superficie marina, nunca por la terrestre (UGV), los cuales no cuentan con ninguna tripulación a bordo para ser conducidos. Son vehículos autónomos que llevan implementados sistemas de navegación por los cuales pueden orientarse o a su vez, pueden estar tripulados en la distancia mediante controles remotos.

El hecho de no ser tripulados por nadie que esté a bordo permite correr una parte más de riesgo a la hora de realizar el trabajo específico para el que se quiera el USV. [1]

Se sabe que estos vehículos ya han sido utilizados con éxito en varios campos como el militar, el de la extracción de recursos, la investigación o la prevención de desastres naturales. A continuación, se hace un breve resumen de lo que ha aportado a cada uno de ellos:

- Sector militar: En el campo militar se han utilizado para numerosos cometidos, ya que, al no haber pasajeros en él, permite realizar su misión con una mayor libertad de movimiento sin poner en riesgo vidas humanas. Los USV permiten una polivalencia y seguridad que ha hecho que muchas embarcaciones tripuladas militares se vean sustituidas realizando cometidos que van desde el rescate humanitario en altamar, hasta el espionaje y defensa de costas. [2]



Fig. 2.1. USV utilizado en misiones militares [3]

- Sector energético: Se utilizan para ayudar en la búsqueda de nuevos emplazamientos en los cuales se puedan encontrar bolsas de gas o petróleo. Estos combustibles fósiles se encuentran en parajes complicados de explorar como puede ser en las profundidades del océano, por lo que la utilización de estas embarcaciones optimiza la búsqueda de estos recursos.

También pueden ser colocados en diversos puntos estratégicos del océano donde pueden recoger energía solar y eólica de manera sencilla.



Fig. 2.2. USV emplazado en el océano recogiendo energía eólica y solar gracias a las placas fotovoltaicas y la hélice que lleva incorporada [4]

- Investigación: Son usados para investigar las superficies marítimas o de las costas, analizando los cambios o alteraciones que hayan podido sufrir a lo largo del tiempo debido a desastres como el cambio climático. A su vez también permiten el acceso a lugares con un perfil complicado como pueden ser cuevas

marinas u otros accidentes geográficos, los cuales supondría un gran riesgo explorar en el caso de usar embarcaciones con gente a bordo.



Fig. 2.3. USV utilizado en tareas de investigación [5]

- Prevención de desastres naturales: En el caso de que un desastre natural como un terremoto haya tenido su epicentro en algún océano o un sitio cercano al mar, la alteración de las mareas y corrientes pueden ayudar a prevenir y salvar muchas vidas a la hora de alertar de tsunamis o fenómenos similares que pueden afectar a una población. En términos humanitarios, este uso podría considerarse como el más importante, ya que una detección a tiempo de un desastre natural de estas características supone salvar miles de vidas, debido a que las medidas de emergencia se iniciarían antes.



Fig. 2.4. USV encargado de registrar los cambios en las corrientes y profundidades de las aguas [6]

- Otros usos: Los USV también pueden ser usados en labores de transporte, lanzamiento de otros vehículos no tripulados o incluso para el rescate de otros USV que hayan podido sufrir algún tipo de avería o problema.



Fig. 2.5. USV encargado de labores de rescate [7]

El uso de USV no solo supone ventajas a nivel humanitario, sino que también proporciona ventajas económicas y de tiempo frente a los vehículos tripulados. [8]

Estos vehículos autónomos suelen estar destinados en parajes cuyo acceso es difícil para embarcaciones tripuladas, por lo que están contruidos con materiales que permitan un ágil movimiento y a la vez resistan posibles accidentes. Al no tener que tener medidas de seguridad específicas para ningún tipo de tripulación ni equipos o alimentos, la carga de los USV se ve reducida casi en su totalidad, por lo que a la hora de obtener muestras son muy útiles ya que contarán con una mayor cantidad de espacio.

El mayor coste que puede albergar este tipo de vehículos reside en el sistema de navegación que posean, ya que requieren de sistemas muy refinados, los cuales sean capaces de adaptarse a las situaciones más adversas. Aun así, la mayoría de estos vehículos albergan la opción de ser controlados y pilotados por control remoto, por lo que, en caso de riesgo o fallo del sistema de navegación, siempre podrá intervenir el operario al mando de esa nave. [9]

Las investigaciones que se han llevado a cabo a cerca de estos sistemas de navegación son las que nos llevan al siguiente subapartado de este Estado del Arte, los cuales son los diferentes métodos que se han utilizado para la planificación de trayectorias.

2.2 Estado del arte de los algoritmos de planificación de trayectorias

Al igual que se intenta optimizar al máximo las características de diseño de los USV que se utilicen, el sistema de navegación es una de las partes más importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar y usar un vehículo autónomo.

Como su propio nombre indica, los vehículos autónomos carecen de conducción manual, al menos bajo condiciones normales, por lo que precisan de un sistema de navegación y control preciso, que les prevenga de posibles accidentes y que a su vez actúe de la manera más rápida posible.

Para este cometido se usarán algoritmos que proporcionarán las rutas que debe realizar el vehículo. En este trabajo, concretamente se trabajará con el algoritmo de Fast Marching, cuya evolución y descripción se explicará en el apartado 4 de este mismo trabajo.

A parte del algoritmo de Fast Marching, existen otros muchos algoritmos y métodos que permiten extraer trayectorias seguras y fiables para el USV. En este apartado se comentarán algunos de estos métodos más importantes y que a su vez, hayan aportado al algoritmo principal de este trabajo (Fast Marching).

Aunque existan multitud de procedimientos para hallar la trayectoria deseada entre dos puntos, no todos son válidos a la hora de aplicarlos a los vehículos autónomos. En este caso, habría que encontrar la aristotélica “virtud” entre todos ellos, para saber cual es el más adecuado. Con esta “virtud”, se hace referencia al equilibrio entre las características básicas que tiene que tener un algoritmo de planificación de trayectorias.

Entre ellas se destacan las siguientes:

- Carga computacional: se podría relacionar con la cantidad de memoria RAM que utilizará el programa que ejecute el algoritmo para extraer la trayectoria. A la hora de elegir, se preferirá una menor carga computacional siempre y cuando no afecte al resultado final de la operación. Una alta carga computacional podría equivaler a un resultado más apto, pero haría que el coste en equipamiento (ordenadores con costosos procesadores y características) y el tiempo de extracción subieran, por lo que no se encontraría el equilibrio deseado. [10]
- Representación de la trayectoria: a la hora de obtener el resultado de aplicar el algoritmo, la representación que se debe obtener debe ser clara y concisa,

evitando así que pueda desembocar en errores de interpretación. Es por ello, por lo que se habla de la suavidad a la hora de representar una trayectoria, ya que se desea que tenga el menor número de brusquedades posibles en la representación, así como que sea lo más continua y uniforme posible.

- Seguridad: cuando se trata de aplicar estos algoritmos a ejemplos reales, es inevitable que el vehículo pueda encontrarse con obstáculos que puedan ocasionarle algún accidente o distorsión en la ruta obtenida. Por ello, el algoritmo que se utilice debe ser fiable, asegurando así que puede sortear estas adversidades; de lo contrario se podría poner el vehículo en peligro.

A partir de estas tres características básicas, se deberá obtener un algoritmo final que proporcione una buena parte de estas cualidades sin que las otras se vean afectadas.

Por ello, se buscará un resultado el cual sea seguro y fiable, que nos proporcione una trayectoria poco brusca con la menor carga computacional posible. Aun así, se modificarán estas características según el contexto de la investigación. Habrá situaciones donde se requerirá de una carga computacional mayor porque se prefiere una representación más precisa, y en otras donde la representación puede ser menos clara favoreciendo así el tiempo de procesamiento del algoritmo. [11]

A continuación, se nombrarán y se describirán varios algoritmos utilizados en la planificación de trayectorias.

Algoritmos tipo BUG

Existen dos clases principales de algoritmos tipo BUG, el tipo I y el tipo II.

La principal diferencia entre los dos reside a la hora de plantear la trayectoria que se va a seguir.

Ambos tipos plantean el vehículo como el punto inicial de la trayectoria, y el destino como el punto final. El vehículo intentará desplazarse del punto X (punto inicial) al punto Y (punto final) siguiendo dos métodos diferentes:

- Tipo I: el vehículo apuntará al punto final y comenzará la travesía en la dirección en la que señale. Si se encuentra con alguna dificultad, este procederá

a navegar alrededor de ella, recordando el punto que más cerca se encuentre al punto final. Desde este punto más cercano, el vehículo volverá a señalar al punto final, siguiendo su trayectoria hasta llegar a él, y efectuando este método de evasión de obstáculos cuantas veces sea necesario.

- Tipo II: el vehículo unirá con una línea imaginaria los puntos iniciales y finales, y comenzará a navegar. En el caso de que se tope con algún obstáculo, este lo sorteará navegando alrededor suyo, hasta encontrar de nuevo la línea imaginaria que se ha creado previamente. Finalmente, llegará a su destino, habiendo abandonado únicamente la línea imaginaria a la hora de evadir obstáculos. [12]

Este algoritmo se rechaza por un motivo de fiabilidad. A la hora de afrontar las dificultades, el método que proporciona tanto el Bug I como el Bug II, sería válido para obstáculos fijos. En caso de encontrarnos un obstáculo que esté en movimiento, por ejemplo, un iceberg u otra nave, este algoritmo fallaría, lo que hace que comprometa la seguridad del vehículo. [13]

Campo Potencial (Cargas Positivas y negativas)

El método del campo potencial fue creado por el científico Khatib O. En dicho método se parte de la misma premisa que en los ejemplos anteriores. Queremos que el vehículo, en este caso el USV, se traslade de un punto inicial hasta un punto final. A diferencia de otros métodos, antes de crear cualquier atisbo de trayectoria, este método hace que se divida el plano en una cuadrícula. En ella, cada cuadro adquirirá un potencial diferente al del resto. Cuanto más se aproximen los cuadros al punto inicial, mayor será su potencial, siendo entonces el punto de partida del vehículo el punto con mayor potencial del plano; mientras que el final será el que menos potencial tenga. [14]

En consecuencia, el vehículo empezará a transitar a través de la cuadrícula intentando alcanzar puntos con menor potencial, de manera que acabará llegando hasta la meta o punto final.

La simpleza de este método reside, en que para evitar que colisione el vehículo con algún obstáculo, se generarán potenciales que hagan que el vehículo se aparte de la misma manera que dos partículas con la misma carga eléctrica lo hacen. Esto hará, que el vehículo esquive esos obstáculos y llegue al objetivo sin ningún problema, por lo que este método es bastante utilizado a la hora de planificar trayectorias en la actualidad.

De hecho, este método forma parte del algoritmo de Fast Marching, ya que antes de ser calculada la trayectoria, se generarán uno o varios potenciales en el mapa que permitirán calcular la ruta final. [15]

Algoritmo de Dijkstra y A* (A Star)

Los algoritmos de Dijkstra y A* son dos de los algoritmos que más se asemejan al algoritmo principal de este trabajo. Ambos parten de la misma base, dividir el espacio en casillas como si de un tablero de ajedrez se tratara. En dicho espacio se encontrarán el punto de salida y el punto de llegada que se quiere alcanzar.

Primeramente, el algoritmo de Dijkstra comenzará analizando cada una de las casillas que rodean la casilla inicial, haciendo sucesivamente este proceso en cada una de las casillas del espacio, lo que hará que se acabe encontrando con la casilla final donde se quiere llegar. Cuando esto sucede, el algoritmo para de procesar y proporciona una trayectoria válida y muy optimizada que une ambos puntos.

La fisura de este algoritmo se encuentra en el tiempo de procesamiento, ya que dependiendo de la distancia que separen los puntos inicial y final, el número de casillas a evaluar aumenta considerablemente, haciendo que este algoritmo se vuelva fiable pero poco eficiente. [16]

Sin embargo, el algoritmo A* soluciona las carencias que tiene el algoritmo de Dijkstra de una manera muy simple, similar a la que el algoritmo de Wagner-Within tiene de definir la estrategia de lote en el campo de la gestión empresarial. Este algoritmo va evaluando los gastos de emisión y almacenaje de los productos, dependiendo de si se emiten lotes para más de una semana, con el gasto de almacenamiento que conlleva; o si se deben de ir emitiendo lotes de productos que cubran las necesidades a cada semana, lo que conllevaría un gasto de emisión semanal. Estos costes se van evaluando semanalmente, escogiendo siempre la opción más barata correspondiente a cada semana, de manera que al final de la planificación se habrá conseguido el mínimo coste de almacenamiento y emisión de productos, para el tiempo que se necesite planificar. [17]

En el caso del algoritmo A Star, se aplica el criterio del mínimo coste, partiendo de dos variables. La primera variable, pertenece al coste que se genera por recorrer casillas en el plano; a mayor cantidad de casillas recorridas, mayor será el coste, por lo que se

tendrá que reducir el coste a partir de la segunda variable. Ésta, equivale al coste virtual que se estima supondría llegar desde la casilla actual, hasta la casilla final.

Este segundo valor, es el que causa una mejora sustancial del algoritmo de Dijkstra, ya que al tener que minimizar el coste de recorrer la trayectoria resultante hasta el destino, el algoritmo siempre tenderá a analizar las casillas que se vayan aproximando a este punto final, a diferencia del algoritmo de Dijkstra, el cual analiza cualquier punto del espacio, independientemente de su lejanía al punto final.

Al igual que el anterior, el A* proporciona una trayectoria resultante óptima, garantizando la ruta más corta entre los dos puntos en el menor tiempo de procesamiento posible.

Es por ello, que el algoritmo A* sigue siendo utilizado a la hora de planificar trayectorias, ya que su fiabilidad a la hora de prevenir obstáculos es adecuada; si al analizar las casillas adyacentes encuentra algún obstáculo, cambia la ruta, de manera que se obtenga la ruta más rápida que permita sortear la dificultad. [18]

Como se comentó previamente, estos dos últimos algoritmos (Dijkstra y A*) sirven de antesala para explicar el algoritmo de Fast Marching, el cual se expondrá en el punto 4, por su similitud de procedimientos. Aun así, en el siguiente punto de este trabajo, se expondrán las regulaciones a las que puede estar sometido el presente proyecto.

3. MARCO REGULADOR

A medida que se van creando nuevos inventos y nuevas tecnologías que sustituyen actividades comúnmente desarrolladas por el ser humano, los organismos legislativos deben ir creando nuevas normativas para legislar sobre esos nuevos objetos y así evitar vacíos legales. En el caso de los drones y vehículos autónomos, al estar actualmente en plena expansión, se requieren de leyes específicas que hagan saber en qué espacios se pueden utilizar y en cuáles no.

En este apartado, se comentará la situación legal en la que se encuentran estos vehículos, ya que la intención de trabajos de investigación como éste es avanzar en el campo del cálculo de trayectorias para luego poder aplicarlo en la realidad, por lo que es necesario saber en qué marco legal se ven expuestos los vehículos de superficie autónomos actualmente, si se quieren llevar a cabo simulaciones reales.

Para ello, primeramente, se debe conocer el nivel de autonomía que tienen los vehículos de superficie, ya que pueden existir varios:

- Nivel 1: Al vehículo se le dotará del nombre de “Barco Inteligente”, puesto que aportará alternativas a la hora de realizar una toma de decisiones. Aún así, necesitaría de la aprobación de la tripulación para llevarlas a cabo, por lo que su nivel de autonomía será bajo.
- Nivel 2: Estos vehículos ya contarán con un sistema de navegación que hará que el vehículo pueda circular de manera autónoma mientras son controlados en la distancia por operarios. No obstante, seguirán contando con tripulación a bordo que pueden llevar a cabo cambios en la ruta o en caso de emergencia intervenir, por lo que, aunque el nivel de autonomía es superior al anterior, aún requiere de tripulación para resolver situaciones concretas.
- Nivel 3: Al igual que el anterior nivel, presentan una navegación autónoma que puede ser alterada o cambiada en la distancia por la gente encargada de ello. La particularidad de estos vehículos es que no presentan tripulación a bordo, por lo que su nivel de autonomía aumenta considerablemente, ya que el vehículo, aun pudiendo ser controlado de manera remota, realizará la mayoría de las tomas de decisiones por él mismo.

- Nivel 4: Este es el nivel más alto de autonomía, ya que el vehículo es completamente autónomo, no presentará ninguna tripulación a bordo y no podrá ser manejado remotamente por ningún operario.

Tal y como se puede ver en los niveles de autonomía que se han expuesto, uno de los principales factores que aplican al considerar el nivel de autonomía de una embarcación es la presencia o no de tripulación a bordo. Se puede decir, de hecho, que es el factor diferencial, ya que las leyes bajo las que se rigen ahora mismo los vehículos marítimos involucran de alguna manera a la tripulación, llegándose a especificar que una embarcación debe tener a bordo el número mínimo de tripulación que garantice que la travesía que realice el vehículo sea segura, lo que haría imprescindible su presencia.

Los vehículos de nivel 1 y 2, al contar con una tripulación en ellos, están recogidos bajo la ley, ya que presentan las condiciones necesarias para la navegación. Sin embargo, los niveles 3 y en especial el 4, no se encuentran en la misma situación, ya que las leyes no reflejan en que marco legal se sitúan, por lo que se puede decir que se hallan en un vacío legal actualmente.

Otra figura indispensable a la hora de pensar en un barco es la del capitán, la cual recoge la ley, será el máximo responsable de las acciones y de las tomas de decisiones que se ejecuten en el navío, siendo indispensable incluso, su presencia en los mandos en las labores de entrada y salida de los puertos. Al igual que ocurre con la tripulación, en los niveles más altos de autonomía, no habrá un capitán presente en el barco, por lo que en este sentido tampoco se hayan legislados.

Es por esto, por lo que las autoridades navales de cada país, y en concreto España, se han puesto a trabajar en una ley que ampare a los vehículos autónomos de superficie. De hecho, estos vehículos se encuentran actualmente en un vacío legal, lo cual puede llevar a confusión, puesto que pueden o no ser considerados como embarcaciones.

En la actualidad, los vehículos de superficie autónomos pueden ser principalmente, considerados de dos maneras:

- Debido a la no presencia de tripulación ni capitán a bordo, los vehículos de superficie autónomos podrían no ser considerados como embarcaciones, llegando así a tener inconvenientes e incluso tener prohibida la navegación por cualquier territorio marítimo nacional, inclusive los puertos, en los cuales no

podrían zarpar, llegar o permanecer. De esta manera, estas embarcaciones solo podrían ser utilizadas en lugares privados, cuya legislación no sea competencia del Estado, tales como piscinas o embalses privados, sobre las cuales se podrían circular estos vehículos libremente, sin necesidad de ningún permiso. [19]

- La otra opción, es que se considere a los USV como embarcaciones normales, obligándoles así a cumplir con las mismas especificaciones que deben satisfacer los demás barcos. Este es el caso de las homologaciones y permisos que se necesitan para navegar por terrenos legislados, incluyendo las inspecciones técnicas rutinarias que se hacen periódicamente a los vehículos y una matrícula que lo identifique. Estas inspecciones, al tenerse que conseguir de la misma manera que una embarcación tradicional, deberán pasarse con los objetos de seguridad básicos que cualquier embarcación con tripulación debería tener, tales como chalecos salvavida. Éstos, una vez pasada la inspección podrán ser quitados de la embarcación, siempre y cuando se reclame una exención en la que se especifique que el barco es autónomo.

Por tanto, queda definido que los USV aún se encuentran en terreno desconocido en cuanto a la ley se refiere, y que será cada país el que decida como actuar con ellos. En el caso de España, se está trabajando en una reforma de la ley, la cual permita incluir a los vehículos autónomos, ya que actualmente todo el marco legal se centra en embarcaciones con presencia de tripulación. [20]

4. MÉTODO DE FAST MARCHING: EVOLUCIÓN Y DESARROLLO

4.1 Fast Marching

El algoritmo de Fast Marching es un método de planificación de trayectorias que se basa para obtener sus resultados en la expansión natural de una onda.

El ser humano se encuentra rodeado de ondas (luz, sonido, ...), las cuales se expanden por el medio de la misma manera, siguiendo el principio de Fermat.

Un ejemplo claro y sencillo para entender esta expansión de las ondas, se puede visualizar a la hora de arrojar un objeto sólido al agua. Al impactar con el agua, el objeto genera unas ondas las cuales se expanden de manera circular por la superficie acuosa, distribuyéndose uniformemente hasta encontrar algún obstáculo que las detenga. Este fenómeno es el que se conoce como Principio de Fermat [21], el cual deduce que las ondas sean del tipo que sean, tenderán a seguir siempre el camino de menor tiempo entre dos puntos. Por supuesto, este concepto va íntimamente ligado al concepto de velocidad de propagación, ya que dependiendo de la superficie en la que nos encontremos, la onda avanzará más deprisa o más despacio, variando de acuerdo con la velocidad de propagación del medio en el que se encuentre. Por ello, si al experimento citado antes, se le cambiara el medio de expansión por agua mezclada con gasolina en vez de solo agua, la onda pasaría de ser circular, a irse deformando, dado que al tener el petróleo una velocidad de propagación menor que la del agua, tardaría más en expandirse por esa superficie. [22]

Esta expansión servirá para saber el tiempo que tarda la onda en alcanzar cualquier punto de la superficie, por lo que se puede reducir el problema a un problema de física simple, donde la expansión se representará como el espacio que ha recorrido la onda, la velocidad que tarda en recorrerlo que será la velocidad de propagación y por último el tiempo que tardará en alcanzar cada uno de los puntos.

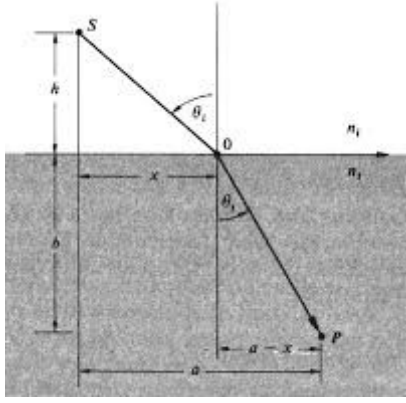


Fig. 4.1 Imagen que representa la variación del índice de refracción de la luz a la hora de incidir en distintos medios [23]

La trayectoria deseada se obtendrá de aplicar el gradiente a la expansión que haya realizado dicha onda, por lo que el método de Fast Marching se reduce a resolver la Ecuación de la Eikonal, la cual relaciona el gradiente del tiempo de expansión de la onda (T), con la inversa de la velocidad de propagación (F).

$$|\nabla T|F = 1 \quad (4.1)$$

Para llegar a esta ecuación, habrá que partir de una de las ecuaciones fundamentales de la física básica, la cual serviría para averiguar el espacio que ha recorrido un objeto si solo se trabajara en una dimensión. Dado que este experimento no se desarrolla en estas circunstancias, se deberán ir aplicando varias operaciones hasta llegar a la ecuación final de la Eikonal.

$$\theta = FT \quad (4.2)$$

Primeramente, se llevará a cabo la derivada del tiempo respecto del espacio de la ecuación (θ), lo que nos permitirá aplicar el gradiente de la función del tiempo de llegada, el cual, como se comentó anteriormente es el que deseamos obtener.

$$1 = F \frac{dT}{d\theta} \quad (4.3)$$

Este gradiente permitirá trabajar con varias dimensiones del espacio, por lo que la ecuación resultante quedará en función únicamente de la posición en la que se trabaje, quedando como variable fuera del gradiente la velocidad de propagación, la cual será inversa a él. [24]

$$\frac{1}{F} = |\nabla T| \quad (4.4)$$

Tras haber desarrollado el fundamento que sigue el método de Fast Marching, será más sencillo comprender su funcionamiento. En primer lugar, se seleccionará el lugar donde se desea que comience la expansión de la onda, simulando el lugar donde impacta la piedra con el agua en el experimento anteriormente citado. Cabe destacar que el algoritmo de Fast Marching utiliza mallas para su aplicación, por lo que se considerará que el punto inicial es un punto de dicha malla en el cual el tiempo de propagación será igual a 0. Tras esto, el algoritmo irá evaluando el tiempo que tarda en llegar a los puntos de la malla que colindan con el punto de origen, los cuales quedarán como puntos “congelados”, es decir, se sabrá el tiempo de propagación que tardará la onda en alcanzarlos. Finalmente, este proceso se repetirá a lo largo de toda la malla, evaluando cada uno de los puntos hasta que el algoritmo se tope con el punto que se ha seleccionado para ser el final de la trayectoria, al cual se le asignará un tiempo de propagación igual al tiempo que tardará en recorrer la trayectoria deseada la onda, similar al procedimiento que utilizaba el algoritmo de Dijkstra.

Sin embargo, este método presenta algunas limitaciones en cuanto a las características del problema se refiere, ya que solo trabajará en situaciones donde la velocidad de propagación se mueva con el mismo signo, lo que quiere decir que la onda siempre viajará expandiéndose desde el punto de origen hasta el punto final, no pudiendo en ningún caso contraerse o volver a alguno de los puntos de la malla los cuales ya haya visitado anteriormente.

Aun así, estas limitaciones pueden ser tratadas como ventajas si el problema a evaluar se adapta a ellas ya que, con estas circunstancias, el problema puede ser considerado como estacionario, lo que hace que se reduzca el tiempo de computación de manera considerable.

Dicho esto, se puede asegurar que el método de Fast Marching es un método simple pero que proporciona resultados en poco tiempo con trayectorias entendibles en la mayoría de los casos, ya que no requiere de mucho espacio para ser procesado, por lo que solo faltaría garantizar que las trayectorias obtenidas sean seguras.

En el caso de que no se halle ningún obstáculo entre los puntos inicial y final, casi con toda seguridad, se obtendrá una trayectoria lineal que una a ambos puntos, siguiendo el criterio de Fermat explicado anteriormente. Pero en el caso de existir obstáculos entre ellos, la situación cambiará.

Para resolver esto, se creará un mapa de velocidades de la malla, en la cual se usarán los colores negro y blanco para designar los obstáculos y el camino libre respectivamente (primer potencial). Al estar usando únicamente dos colores, el algoritmo nos está devolviendo dos datos, los cuales tendrán que ver con la velocidad de propagación. De esta forma, se obtiene a partir de un mapa binario, el mapa de velocidades en el cual el color negro advertirá de la presencia de un obstáculo y presentará una velocidad de propagación de 0, mientras que el color blanco que representa el camino sin obstáculos presentará un valor de 1.

Gracias a esto, el algoritmo desarrollará una trayectoria la cual no pasará por ningún obstáculo, por lo que también queda garantizado que el método de Fast Marching proporciona trayectorias seguras.

A pesar de todas estas ventajas, el método de Fast Marching propuesto por J. Sethian, admitía mejoras ya que la trayectoria otorgada será la más corta en distancia, pero no necesariamente la más corta en términos de tiempo, ya que la trayectoria puede verse ralentizada en algunos momentos al pasar cerca de los obstáculos detectados, por lo que se crearon algunas variantes que perfeccionaron lo descrito en este apartado. [25]

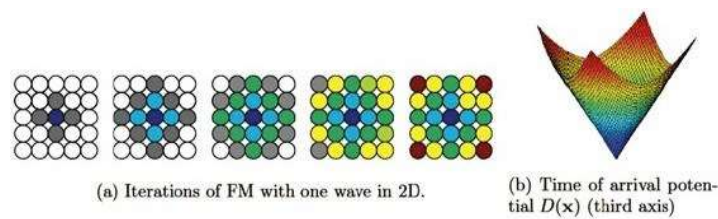


Fig. 4.2. Representación gráfica de la expansión de la onda del método de Fast Marching [26]

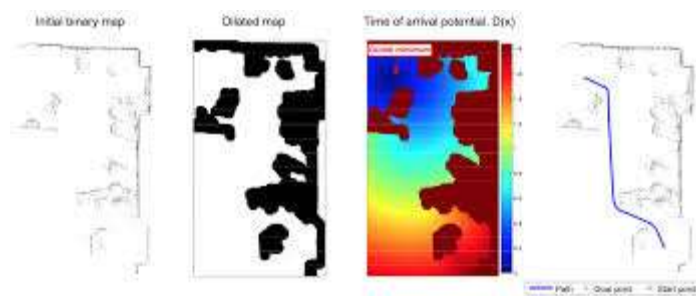


Fig. 4.3. Representación de un cálculo de trayectoria realizado por el método de Fast Marching [27]

4.2 Fast Marching Square

A la hora de planificar una trayectoria, se dependerá de varios factores que harán decidir utilizar un algoritmo u otro. No es lo mismo planificar una trayectoria en un medio marino, donde lo máximo que puede influir es una corriente y donde se buscará una trayectoria de menor distancia para ahorrar combustible y minimizar el tiempo de viaje, que calcular una trayectoria para un robot enviado a alguna expedición en medios complicados donde la seguridad prevalece por encima de todo.

Aunque anteriormente se tratara el algoritmo de Fast Marching como una forma segura de planificar una trayectoria, esto puede llegar a ser debatido. Debido a su deseo de minimizar la distancia recorrida entre los puntos inicial y final, el método de Fast Marching proporciona trayectorias las cuales, a la hora de esquivar los obstáculos, pueden pasar cerca de esquinas y paredes, lo cual puede suponer un riesgo para el vehículo que las recorra. Por ello, se creó una variante del método llamada Fast Marching Square.

Como su propio nombre permite deducir, el Fast Marching Square es un método que aplica dos veces el algoritmo de Fast Marching. En la primera, al igual que pasa con el método normal, se creará un mapa binario que hará que los obstáculos se reflejen como negros y el camino libre como blanco, obteniendo a partir de ahí, una ruta entre los puntos inicial y final que se seleccionen.

En cambio, en el caso del Fast Marching Square, es necesario realizar un paso más, el cual consistirá en crear un mapa de velocidades desde el punto final (segundo potencial), con lo que se conseguirá que en vez de un mapa binario, se tenga un mapa en escala de grises, donde el negro indicará una velocidad de propagación 0 con los obstáculos, el blanco una velocidad de uno, pero entre medias existirán tonalidades de grises las cuales cuanto más oscuras sean, indicarán una velocidad menor, ya que se van acercando al negro. [28]

Esto es muy importante, ya que el Fast Marching Square permitirá crear una trayectoria que tenga un balance ideal entre seguridad y tiempo, ya que el robot o el aparato que lleve a cabo este recorrido tendrá una distancia de seguridad suficiente a la hora de sobrepasar los obstáculos, que permite que no se deba frenar en demasía e incluso mantener la velocidad si se tiene la holgura suficiente para hacerlo.

Por tanto, este método proporciona, no solo la trayectoria más segura a la hora de evitar choques e infortunios, sino que también proporciona la ruta más óptima en cuanto a tiempo se refiere, ya que, aunque recorra algunos metros más que la trayectoria obtenida con Fast Marching normal, lo compensa no ralentizándose a la hora de ir por terrenos más complicados. [29]

A parte, este método se suele saturar, permitiendo así decidir la holgura mínima necesaria con la que el vehículo debe esquivar los obstáculos y a parte la velocidad con la que debe pasar por esas zonas más peligrosas.

Por tanto, se puede considerar el Fast Marching Square un método mucho más perfeccionado para obtener trayectorias que el método de Fast Marching normal, aunque dependiendo de la aplicación que se le quiera dar, se escogerá uno u otro, ya que como es obvio el Fast Marching Square requerirá de un tiempo mayor de ejecución que el anterior.

4.3 Fast Marching Star

Este método, al contrario que el Fast Marching Square, es una mejora del método de Fast Marching creada buscando más la eficiencia que la seguridad.

El método de Fast Marching Star es una actualización del método de Fast Marching que busca disminuir el tiempo de procesamiento del algoritmo. Dado que el algoritmo de Fast Marching es rápido ya de por sí, este método será utilizado en el caso de tener bastantes trayectorias que extraer ya que, en caso contrario, la diferencia será prácticamente nula.

El Fast Marching Star sigue el principio del algoritmo A Star explicado anteriormente, el cual mejoraba sustancialmente el algoritmo de Dijkstra ya que hacía que el tiempo de procesamiento se redujera aplicando el algoritmo solo para aquellas zonas en las que la trayectoria se iba a calcular. De la misma forma, el Fast Marching Star, sigue el principio de Fast Marching de expansión de la onda desde el punto inicial hasta toparse con el punto final, pero con la diferencia de que el frente de onda, no se expandirá por toda la malla, sino que solo se expandirá en dirección al punto final que se seleccione, por lo que el procesamiento del algoritmo será más corto que si se aplicara a todo el plano en el que se trabaja. [30]

4.4 Decisión del algoritmo utilizado para este trabajo

Tras haberse descrito el método de Fast Marching, y las variables y mejoras que existen de él, se concluye que el método óptimo para aplicar en este trabajo es el propio método de Fast Marching.

Como se citó anteriormente, la finalidad de este proyecto es el calcular trayectorias para embarcaciones autónomas de superficie las cuales sean capaces de recorrer sin ningún problema. A la hora de valorar que algoritmo seleccionar, se ha visto que en la masa oceánica, el mayor obstáculo o alteración que puede sufrir una embarcación son las fuerzas provocadas por las mareas y corrientes, por lo que el método de Fast Marching Square se desestima, ya que en este caso, interesa extraer una trayectoria rápida y directa que la embarcación sea capaz de recorrer en poco tiempo para así no crear gastos innecesarios de combustible. Del mismo modo, como en este proyecto no se van a ejecutar una gran cantidad de iteraciones simultáneamente, se desestima el método de Fast Marching Star ya que el tiempo de procesamiento variará en milésimas de segundo, lo cual es inapreciable.

Al método de Fast Marching que se utilizará, se le añadirán campos vectoriales, los cuales actuarán de diversa forma dependiendo del valor que se les den, modificando la trayectoria extraída; de manera que el resultado que se obtendrá será la trayectoria más adecuada para abordar la corriente que se le ajuste a cada caso.

5. APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Fast Marching aplicado a casos sencillos

Tras mostrar en los anteriores puntos la base sobre la que se va a trabajar en este trabajo, toca hablar de los resultados de éste, evolucionando poco a poco con cada caso que se exponga.

Primeramente, para presentar la funcionalidad del algoritmo de Fast Marching se ha elegido la imagen de una habitación vacía, sin ningún tipo de obstáculo, para comprobar la extracción de la ruta.

Tal y como se comentó en anteriores puntos, si no hay obstáculos entre medias, y tampoco corrientes o fuerzas que alteren la ruta, el método de Fast Marching buscará el camino más corto entre los dos puntos, es decir, la línea recta.

Es por ello que, en este primer caso, como puede ser apreciado en la siguiente imagen, la trayectoria conseguida es una línea totalmente recta que une un extremo de la habitación con el otro.

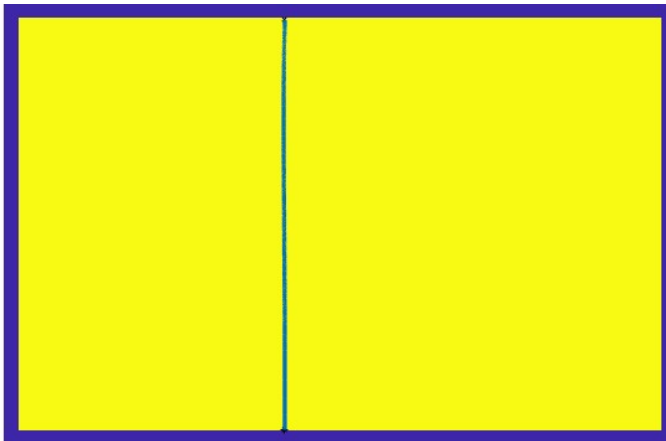


Fig. 5.1. Representación de la trayectoria calculada en una habitación vacía

En este caso de extrema sencillez podemos también comprobar, como la onda se expande de manera circular por todo el terreno de la habitación, hasta que encuentra el final de su expansión en el punto final de la trayectoria. Cada color que se puede apreciar en la imagen representa un tiempo diferente de llegada, cuanto mayor se aleje del punto inicial, mayor será ese tiempo, y a la vez el radio de la circunferencia del círculo que proyecta la onda será mayor, porque habrá cada vez más puntos con el mismo tiempo de llegada.

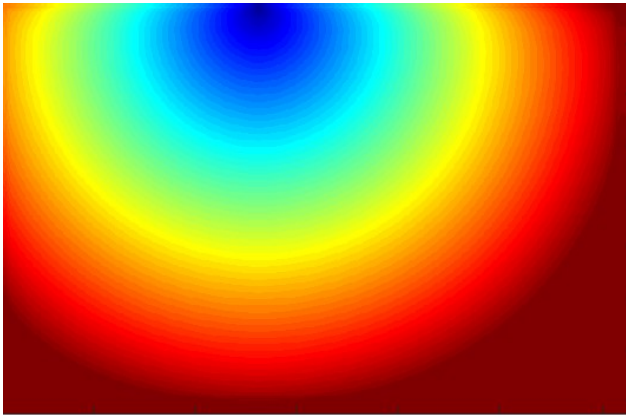


Fig. 5.2. Representación de la expansión de la onda en la habitación vacía

En el siguiente caso, se usará la misma imagen, la de la habitación sin obstáculos, pero se someterá a la trayectoria a un campo vectorial continuo, lo que hará que dependiendo de hacia donde se desplace ese campo vectorial, la trayectoria quede alterada, dejando de ser una línea recta.

En la siguiente imagen, se puede apreciar como el campo vectorial modifica la trayectoria resultante, haciendo que la ruta tenga que curvarse hacia la izquierda.

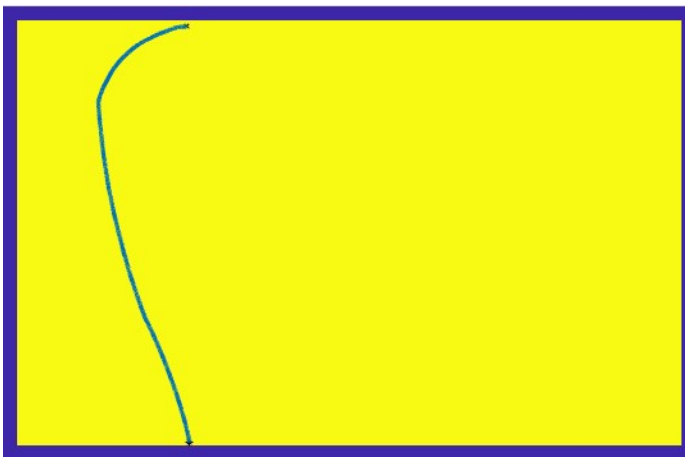


Fig. 5.3. Representación de la trayectoria calculada en una habitación vacía afectada por un campo vectorial

Tal y como se puede apreciar en la trayectoria, el campo vectorial es aplicado en el punto donde se inicia el cálculo, por lo que, primeramente, el objeto se ve obligado a crear un gran arco para poder atravesar el campo vectorial por el que se ve afectado, mientras que al final de la trayectoria, se va viendo como poco a poco va asemejándose más a la trayectoria pasada donde no había corriente.

En este caso, es muy significativo ver la imagen donde se perfila la expansión que ha seguido la onda, ya que en ella se refleja un dato muy característico, los puntos que están en el lado derecho del punto inicial, es decir, los puntos que están contrarios a la dirección del campo vectorial son los puntos que requerirán más tiempo para llegar. Por supuesto, se ha utilizado un valor de campo vectorial muy alto para poder representar este detalle, ya que lo normal, es que estos puntos no requieran de tanto tiempo para ser alcanzados, porque a pesar de que el campo vectorial incida muy cerca de ellos, pero en dirección contraria, no dejan de ser puntos muy próximos al punto inicial de la trayectoria.

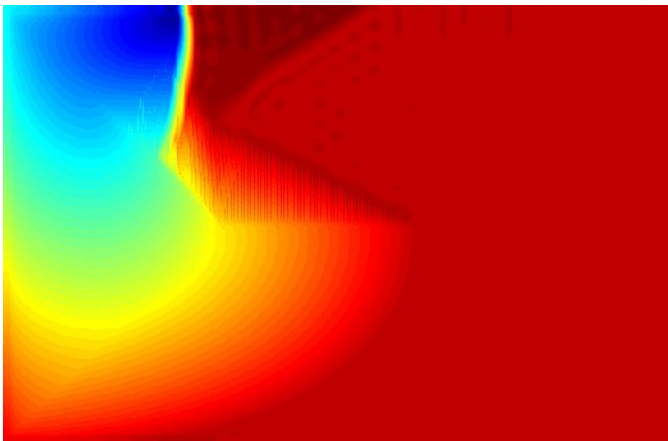


Fig. 5.4. Representación de la expansión de la onda en la habitación vacía aplicándole un campo vectorial

En estos casos tan sencillos, en los que se habla de un espacio cerrado, el campo vectorial solo podría imaginarse como una corriente de aire o como una pendiente, que hiciera que el robot o el objeto que necesita dicha trayectoria alterase su movimiento de la manera que se está viendo en los casos expuestos. Pero más adelante, se expondrán ejemplos en lugares reales de la Tierra donde el campo vectorial tiene mucho más sentido de ser aplicado, ya que se identificará con diversos tipos de corrientes.

En el siguiente caso, se tendrá la imagen de una habitación con obstáculos en ella, lo que hará que la onda no pueda propagarse de manera uniforme en el espacio.

Para apreciarlo, tenemos las siguientes imágenes, en las cuales se vuelve a no aplicar ningún tipo de corriente, por lo que, primeramente, antes de que la onda choque con alguna pared, la propagación de la onda vuelve a ser circular. Una vez la onda topa con alguna de las paredes, se aprecia como ésta se ve distorsionada y pasa a tener una forma irregular.

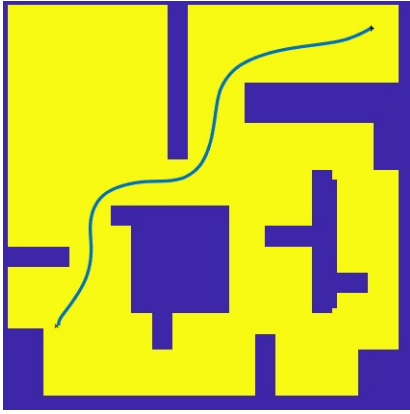


Fig. 5.5. Representación de la trayectoria calculada en una habitación con obstáculos

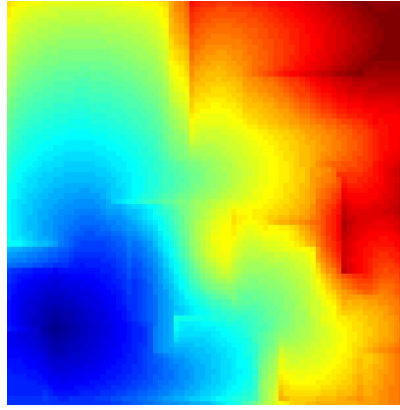


Fig. 5.6. Representación de la expansión de la onda en una habitación con obstáculos

Este caso vuelve a ser un caso sencillo, pero se puede complicar de manera que el robot tenga que afrontar obstáculos y corriente al mismo tiempo. En ese caso, tal y como se podrá apreciar en las siguientes figuras, se ve como dependiendo del valor que se le dé al campo vectorial, la trayectoria resultante esquivará el obstáculo central por un lado u otro, quedando evidente la repercusión que tiene el campo vectorial a la hora de realizar el trazado de la trayectoria.

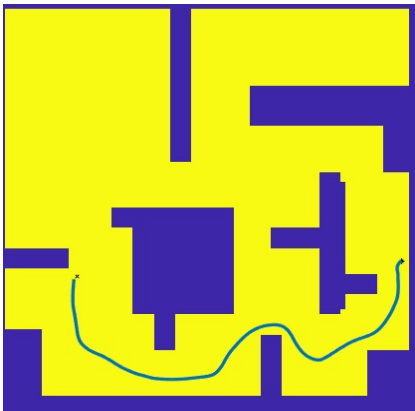


Fig. 5.7. Representación de la trayectoria calculada en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección suroeste

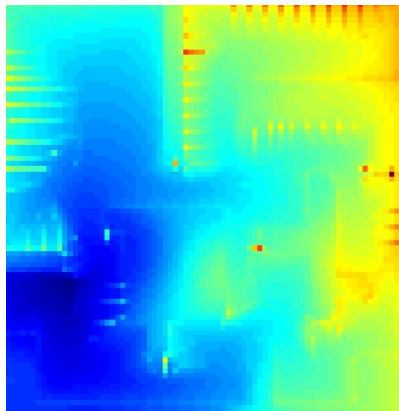


Fig. 5.8. Representación de la expansión de la onda en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección suroeste

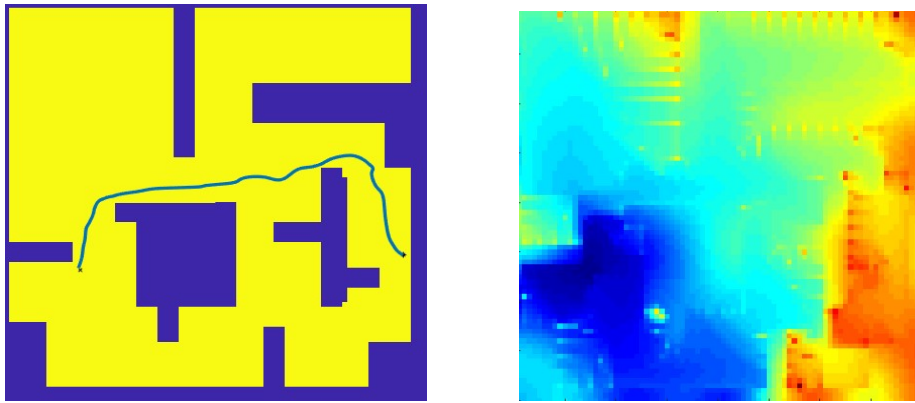


Fig. 5.9. Representación de la trayectoria calculada en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección noreste

Fig. 5.10. Representación de la expansión de la onda en una habitación con obstáculos afectada por un campo vectorial con dirección noreste

En el primer caso, el campo vectorial que se aplica es un campo en dirección suroeste, por lo que podemos ver la facilidad de expansión de la onda hacia la esquina inferior izquierda, al contrario que en la onda del segundo ejemplo, donde se aplica un campo en dirección contrario, noreste, en el que se pueden apreciar tonalidades más verdosas de azul en esta misma esquina, lo que implica que la onda tarda más en llegar a este mismo punto. Además, si apreciamos las tonalidades en el punto final de ambas imágenes se puede ver que la primera trayectoria será más rápida que la segunda, ya que en la segunda acaban viéndose tonalidades rojas y naranjas. Este aspecto se puede deber, a que, en la tercera figura, para esquivar el obstáculo central, la onda necesitaría de un leve movimiento hacia la izquierda para esquivar la esquina saliente, lo cual es impedido por el campo vectorial que discurre hacia la derecha, por lo que también se puede asumir que el objeto que recorra esta segunda trayectoria deberá disminuir notablemente la velocidad al esquivar este obstáculo, quedando así una trayectoria más lenta que la primera.

5.2 Fast Marching aplicado a casos con corrientes marinas

Tras visualizar en casos sencillos, que el método de Fast Marching funciona, es el turno de aplicarlo al caso de estudio de este trabajo.

Para ello, se someterán las trayectorias a un campo vectorial, como en los casos anteriores, pero con la particularidad, de que esta vez, el campo vectorial tendrá la función de representar las corrientes marinas. Esto implica que los resultados aquí

obtenidos, podrían ajustarse de alguna manera a la realidad, siempre contando con que existen numerosas limitaciones.

Se conoce como corriente marina, a los movimientos que experimentan las aguas de los océanos y los mares, en función de diversos factores como pueden ser el viento, la proximidad de las costas, los movimientos de traslación y rotación terrestres, etc.

Se puede intuir, por tanto, que las corrientes marinas no son para nada uniformes, es decir, en cada lugar de la Tierra, dependiendo de los diversos factores citados, la corriente discurrirá en uno u otro sentido, no llegando nunca a presentar una dirección y sentido constantes.

Esto hace que la experimentación se vea dificultada en gran manera, ya que, si se aplica a los USV, estos necesitarán de un sistema de navegación el cual esté pendiente en cada momento de cambios constantes en las mareas, lo cual siempre será más complicado de hallar que si las mareas fueran constantes, puesto que permitiría trazar una trayectoria desde el principio.

Por ello, se ha extraído el dato de las corrientes oceánicas correspondientes a un día y momento determinado. En este caso, la imagen corresponde al día 5 de junio del 2019. Todas las imágenes e información que se obtienen de la web State of the Ocean, se obtienen del siguiente enlace: [https://podaac-](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/soto/#b=BlueMarble_ShadedRelief_Bathymetry&l=oscar_l4_oc_third_deg_oceancurrent_dir_color(la=true),GHRSSST_L4_MUR_Sea_Surface_Temperature,MODIS_Aqua_CorrectedReflectance_TrueColor,modis_aqua_l3_chla_daily_4km_l_chlorophyll_a_8640_x_4320_daynight,jpl_l4_mur_ssta_ssta_36000_x_18000_daynight&ve=-199.69191628422232,-97.1343356876844,230.30808371577768,104.98806014564894&pl=false&pb=false&d=2019-06-05&ao=false&as=2019-06-07&ae=2019-06-14&asz=1/day&afr=500&tlr=days)

[tools.jpl.nasa.gov/soto/#b=BlueMarble_ShadedRelief_Bathymetry&l=oscar_l4_oc_third_deg_oceancurrent_dir_color\(la=true\),GHRSSST_L4_MUR_Sea_Surface_Temperature,MODIS_Aqua_CorrectedReflectance_TrueColor,modis_aqua_l3_chla_daily_4km_l_chlorophyll_a_8640_x_4320_daynight,jpl_l4_mur_ssta_ssta_36000_x_18000_daynight&ve=-199.69191628422232,-97.1343356876844,230.30808371577768,104.98806014564894&pl=false&pb=false&d=2019-06-05&ao=false&as=2019-06-07&ae=2019-06-14&asz=1/day&afr=500&tlr=days](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/soto/#b=BlueMarble_ShadedRelief_Bathymetry&l=oscar_l4_oc_third_deg_oceancurrent_dir_color(la=true),GHRSSST_L4_MUR_Sea_Surface_Temperature,MODIS_Aqua_CorrectedReflectance_TrueColor,modis_aqua_l3_chla_daily_4km_l_chlorophyll_a_8640_x_4320_daynight,jpl_l4_mur_ssta_ssta_36000_x_18000_daynight&ve=-199.69191628422232,-97.1343356876844,230.30808371577768,104.98806014564894&pl=false&pb=false&d=2019-06-05&ao=false&as=2019-06-07&ae=2019-06-14&asz=1/day&afr=500&tlr=days)

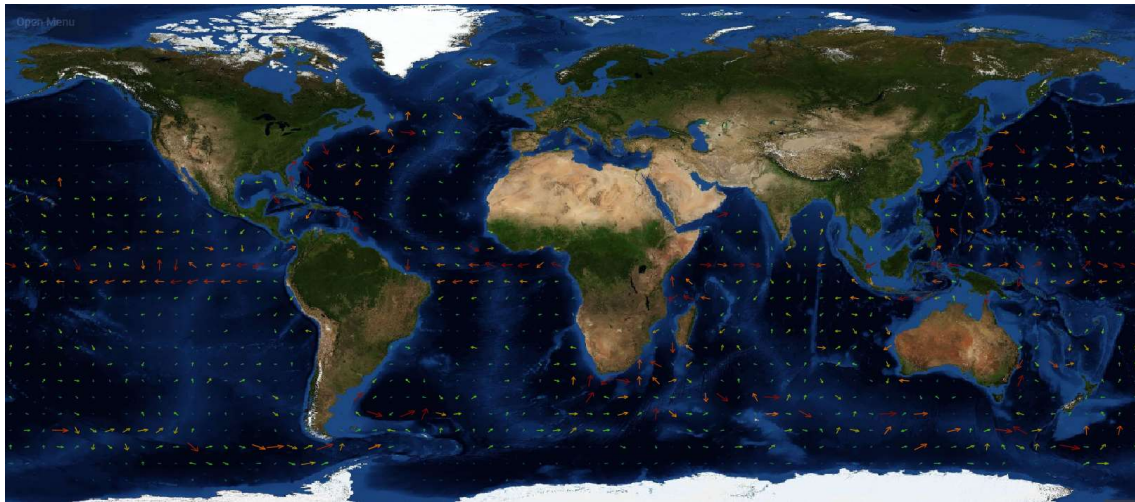


Fig. 5.11. Representación de la dirección y el módulo de las corrientes marinas el día 5 de junio. Imagen extraída de la web State of the Ocean

Como es posible apreciar en la imagen, los vectores no siguen un patrón fijo hacia ninguna de las direcciones, es más, cambian de forma totalmente impredecible, por lo que se podrá ver tanto corrientes que choquen las unas con las otras, como corrientes que se alejen entre ellas. También se destaca que las velocidades de esas corrientes varían dependiendo del color del vector, siendo las verdes las corrientes más débiles, y siendo las rojas las corrientes con más fuerza.

Vista esta imagen, es difícil de atisbar como se podría calcular una trayectoria a través del método de Fast Marching teniendo en cuenta la aleatoriedad de los vectores de corrientes. Es por ello que, únicamente se podría llevar a cabo esta experimentación en base a dos opciones; la primera consistiría en dividir la trayectoria deseada en numerosos tramos, aportando en cada tramo su correspondiente corriente, lo que haría que la trayectoria fuera bastante inexacta y a la vez bastante compleja de conseguir; la segunda será asumir una misma dirección para la corriente en un tramo, lo que nos permitirá someter a esa corriente a un campo vectorial y ver cómo se comporta la trayectoria ante él.

Aunque se vayan a usar corrientes homogéneas para la experimentación de este trabajo, se ha querido comprobar el comportamiento del método de Fast Marching para una corriente heterogénea la cual va cambiando de manera gradual.

En el caso en cuestión se presenta la imagen de una masa de agua. Se asume que el color blanco pertenece a la Tierra, en la zona del Mar Adriático. Las corrientes sufren el viento de Bora, el cual es un viento característico de la zona analizada y que provoca este perfil de corrientes. [31]

En la imagen se puede apreciar como la trayectoria une los dos extremos, los cuales en la realidad representarían a Italia y Croacia. La trayectoria parte desde el lado derecho, Croacia, viéndose arrastrada hacia arriba por una corriente ascendente, paralela a ambas líneas de costas. Esta trayectoria no se ve modificada hasta que, debido a la proximidad con la costa italiana, se observa como la corriente empieza a cambiar de dirección, empezando a tender más hacia la izquierda, lo que provoca una curva más pronunciada en la misma dirección izquierda que permita sortear el cambio de esa corriente.

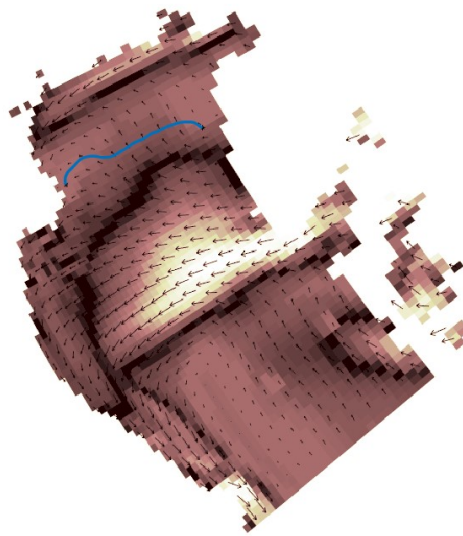


Fig. 5.12. Representación de la trayectoria sometida a la corriente de Bora

Desafortunadamente, esta gradualidad en el cambio de las corrientes es muy difícil de ver en la masa oceánica, por lo que en este trabajo se ha tomado como opción usar corrientes mayormente homogéneas, aunque en algunos casos experimentarán leves cambios que se reflejarán en la actitud de la trayectoria.

En el caso del siguiente ejemplo que se expone, se ha obtenido la imagen de la bahía entorno a la que se construye la ciudad de Sidney, Australia. En este caso, se han ido aplicando corrientes aleatorias en diferentes direcciones y módulos para los mismos puntos iniciales y finales de la trayectoria, lo que permite comprobar como ésta va variando en función de la corriente aplicada.

En la primera foto, se puede ver como la trayectoria es una línea recta, que une ambos puntos de la Bahía de Botany. Esto se debe, a que no hay ninguna corriente aplicada en ella, por lo que la trayectoria no se verá afectada por ninguna fuerza.



Fig. 5.13. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany sin campos vectoriales aplicados

En el caso de la segunda foto, la trayectoria cambia, viéndose ligeramente girada hacia la izquierda. Esto bien podría representar que la marea esté subiendo, es decir, que se encuentre en ese momento en un caso de pleamar, donde la profundidad del agua se maximiza. A lo largo del día, se pueden llegar a dar dos casos de este fenómeno, el cual es muy visible en terrenos como bahías o playas.

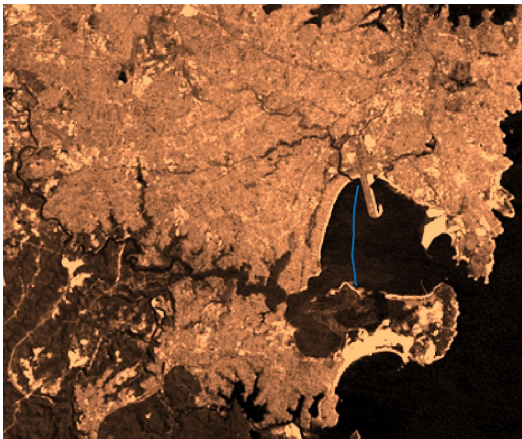


Fig. 5.14. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany sometida al efecto de la pleamar

El fenómeno contrario de la pleamar es conocido como la bajamar, el cual se representa en la tercera foto. Esta acción supone una bajada del nivel del mar hasta un mínimo, en el cual se alcanza la profundidad más baja de las aguas para ese terreno. Al igual que en la pleamar, la bajamar se registra dos veces cada veinticuatro horas, haciendo que la corriente discorra en sentido derecho, es decir, hacia fuera de la bahía, llevándose consigo y provocando una alteración en la trayectoria, que tenderá hacia el lado derecho.

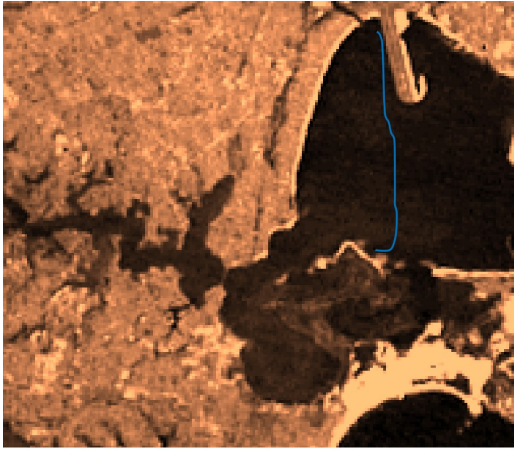


Fig. 5.15. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany sometida al efecto de la bajamar

En la imagen, también se pueden apreciar dos aspectos importantes. El primero, es que, en la zona superior de la bahía, donde se encuentra el aeropuerto de Sidney, la trayectoria se ve menos afectada por estos dos fenómenos, que en la parte inferior de la imagen. Esto se debe a que la zona saliente, actúa como barrera, de manera que la corriente será más tranquila en la zona superior que en la inferior. Aparte, el segundo aspecto a tener en cuenta va muy ligado al primero, ya que la bahía no acaba en la zona principal de la foto, sino que se prolonga hacia la izquierda. Esto no debería actuar sobre la trayectoria de ninguna forma, de no ser porque dicha continuación de la bahía se haya en la parte inferior izquierda de la misma, estrechándose considerablemente, por lo que al experimentar ambos fenómenos, sobre todo el de bajamar, la corriente será mucho más fuerte en la zona inferior que en la superior, lo que provocará que la trayectoria sufra una modificación considerable hacia la parte inferior derecha de la imagen, tal y como se puede apreciar en la tercera figura.

Tanto la cuarta como la quinta foto son consecuencia de aplicar el campo vectorial, en el punto de inicio, es decir, el punto superior de la bahía, por lo que se puede apreciar como en ambos casos, la corriente, esta vez, si afecta a la parte superior de la trayectoria. Estos casos, son sucesos supuestos, que se han agregado para contemplar todo tipo de resultados diferentes, pero en lo que respecta a la realidad, tanto la segunda como la tercera imagen, son mucho más aproximadas a ellas.

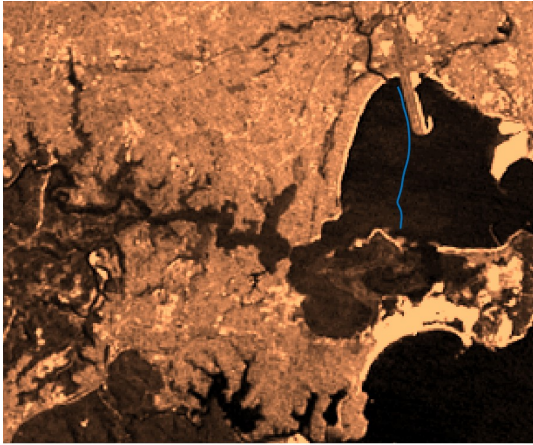


Fig. 5.16. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany aplicándole un campo vectorial orientado hacia la derecha en el punto superior

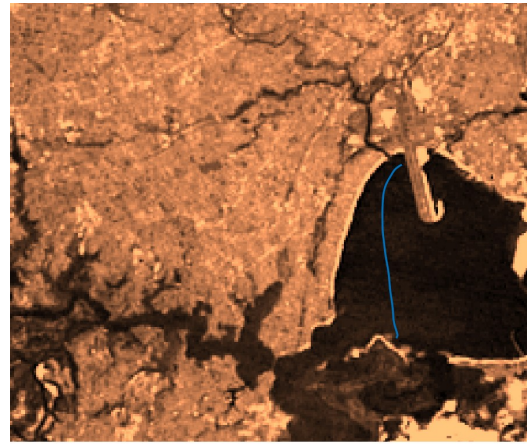


Fig. 5.17. Representación de la trayectoria obtenida en la Bahía de Botany aplicándole un campo vectorial orientado hacia la izquierda en el punto superior

Seguidamente, abandonando la Bahía de Botany, se ha querido experimentar con la misma imagen, pero en un lugar diferente. En este caso, esta zona corresponderá a la costa de la ciudad de Sidney, en la cual se dibujará una trayectoria casi horizontal, de manera que se inicie en mar abierto y finalice su recorrido cerca de la costa.

En las dos primeras figuras se puede observar, las consecuencias de aplicar diferentes corrientes sobre esta trayectoria ya citada. En la primera imagen se muestra un campo vectorial en dirección ascendente, pero de muy poco módulo, lo que provocará leves alteraciones de la trayectoria. De la misma manera, se aplicará la misma corriente, pero con un módulo más alto en la segunda foto, por lo que se puede apreciar, un aumento en la curvatura de la trayectoria al tener que sobrellevar esta corriente más fuerte.

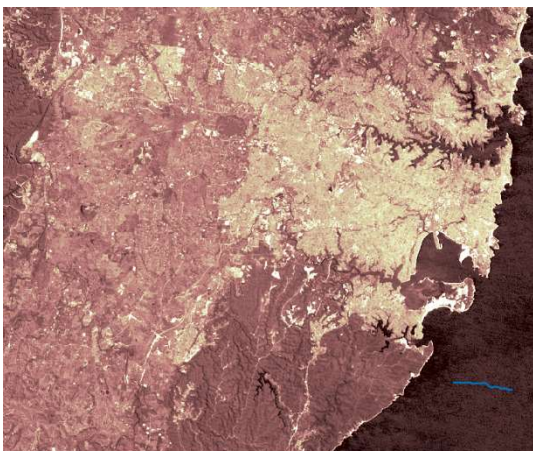


Fig. 5.18. Representación de la trayectoria obtenida en la costa de Sidney sometida a un campo vectorial con dirección norte de bajo módulo

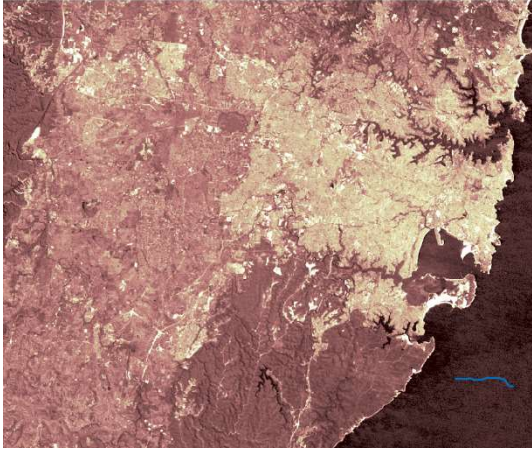


Fig. 5.19. Representación de la trayectoria obtenida en la costa de Sidney sometida a un campo vectorial con dirección norte de alto módulo

En estos casos, al estar representando un tramo de aguas abiertas, no tendría sentido adjuntar una trayectoria totalmente recta, ya que el hecho de que el mar esté totalmente en calma sería un caso utópico. Es por ello, por lo que las trayectorias, tampoco siguen un perfil suave de curvatura, ya que la corriente, a pesar de ser ascendente, no se aplicará en todos los puntos de la misma forma, por lo que se pueden apreciar picos en ambas trayectorias donde se asciende de una manera más leve, e incluso se llega a descender.

Al igual que con la Bahía de Botany, estas dos imágenes, no dejan de ser supuestos casos que raramente van a acontecer. Se sabe esto, gracias a el perfil de corrientes que se ha utilizado anteriormente para demostrar la heterogeneidad de las corrientes oceánicas en el mundo. Es por ello, por lo que se ha obtenido el mismo dato de corrientes, pero aplicado a la zona del Mar de Tasmania, es decir, la zona que aplica a las dos anteriores imágenes.



Fig. 5.20. Representación de las líneas de corriente en la zona del Mar de Tasmania. Imagen extraída de la web State of the Ocean

En la imagen, se puede apreciar como los vectores de corriente siguen prácticamente la misma dirección, es decir, siguen una trayectoria descendente, orientada hacia la izquierda, por lo que se podría decir, que representan una corriente paralela a la línea de costa.

Además, se puede visualizar gracias a los colores en los que se representan los vectores, que las flechas correspondientes a la corriente más próxima a la costa se caracterizan por estar en color verde y amarillo, mientras que los vectores que se van alejando más de la costa, se dibujan en naranjas y rojos. La conclusión que se puede extraer de esto es que la corriente va disminuyendo su módulo cuanto más se aproxima a la costa de Australia.

Por tanto, viendo la forma que tienen las líneas de corriente en el perfil adjunto, es fácil deducir, que la corriente aplicada en las dos anteriores imágenes es errónea. Por lo que, gracias a la información obtenida, se ha realizado una prueba en la que la corriente tendrá un camino descendente, tendiendo ligeramente hacia la izquierda.

Para ello, se han usado los mismos puntos de inicio y final que se usaron en las dos imágenes anteriores, resultando así la trayectoria expuesta en la siguiente figura.

En ella se puede apreciar, una curvatura de forma cóncava, que representa la acción de la corriente anteriormente expuesta. Además, al estar visualizando un punto inicial y final, que no se encuentran en la propia costa, se aprecia, como la trayectoria en su mitad, se curva de manera más considerable que en el extremo izquierdo, donde dicha

curvatura disminuye hasta llegar al punto final del camino, tal y como se mostraba anteriormente con los colores en la imagen de los vectores.

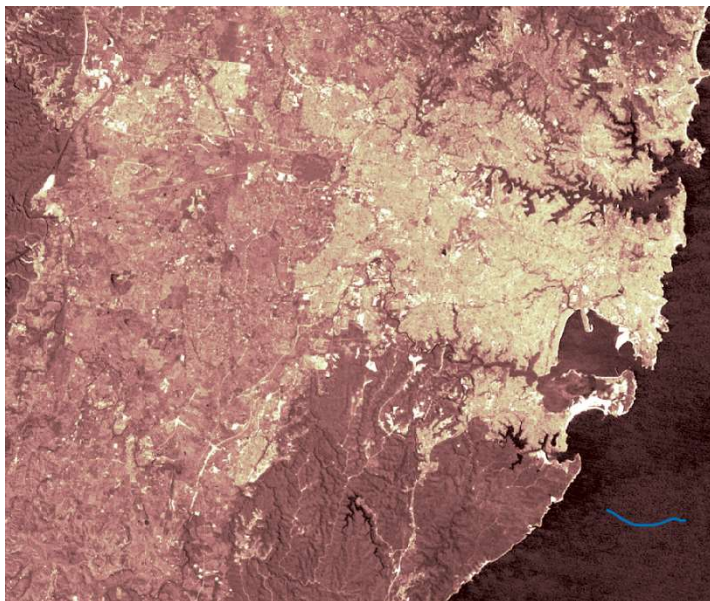


Fig. 5.21. Representación de la trayectoria obtenida en la costa de Sidney sometida a un campo vectorial de dirección suroeste

5.3 Fast Marching con vectores de corriente

Tras haber expuesto varios ejemplos de cómo poder aplicar el método de Fast Marching, es turno de aplicar el algoritmo a diversas localizaciones del globo. Para ello, se ha hecho uso de la herramienta de simulación de la empresa Google, Google Earth, la cual permite visualizar la Tierra y otras partes del Universo con gran detalle.

Gracias a este programa, se han conseguido obtener diferentes lugares del planeta donde poder aplicar el algoritmo de Fast Marching de manera óptima. Aun así, a lo largo de este trabajo, se ha considerado que las trayectorias obtenidas de manera incierta, con campos vectoriales aleatorios, pueden servir como prueba del buen funcionamiento del método, pero no alcanzan a mostrar resultados que se puedan aplicar en la realidad. Es por ello que en los siguientes casos que se expondrán, se ha comenzado a utilizar los vectores de corriente dentro de las propias imágenes, lo que ayudará a visualizar la dirección y sentido de las corrientes marinas.

Para hacer uso de dichos vectores, se han utilizado varias toolboxes aplicadas al software de programación Matlab, las cuales han posibilitado el dibujo de los vectores

en la simulación de Google Earth, consiguiendo así imágenes nítidas con vectores con diferentes direcciones y sentidos.

Estos vectores dibujados sobre el mapa de Google Earth aparecen tanto en las masas de agua como en las plataformas terrestres, por lo que se ha interpretado, que las flechas corresponden a la dirección de las corrientes de aire. En este trabajo, aun sabiendo que la dirección de las corrientes marinas se rige por otros muchos factores además de las corrientes de aire, se ha considerado que la dirección de los vectores de corrientes de aire sea la misma que la dirección de las corrientes marinas.

Para obtener la dirección del viento que ocasionará las corrientes, se ha utilizado el método del gradiente, de manera que el propio gradiente de los vectores dibujados en la imagen servirá de dato para aplicar la dirección del campo vectorial que modificará la trayectoria obtenida con el método de Fast Marching.

Además, con cada ejemplo que se obtenga de las imágenes extraídas de Google Earth, se aportará un caso real basado en las corrientes dibujadas en la web State of the Ocean, por lo que cada uno de los lugares escogidos contará con un ejemplo ficticio, el de Google Earth, y otro que se ajusta a la realidad.

5.3.1 Estrecho de Gibraltar

El primer lugar escogido para esta tarea será el Estrecho de Gibraltar. Dicha localización, separa la Península Ibérica del continente africano, en un tramo reducido de espacio, por lo que en ella se producen corrientes muy fuertes y significativas, ya que, en dicha zona confluyen el océano Atlántico y el Mar Mediterráneo.

En la imagen, se pueden ver los vectores de aire, representados en color blanco y con la punta de color rosáceo. Éstos, tienen una dirección hacia la derecha, la cual tiende ligeramente hacia abajo. En la imagen se puede ver la trayectoria resultante de aplicar el algoritmo con esta dirección para el campo vectorial. Se ve como la trayectoria azul, es decir, la trayectoria resultante, tiende hacia la derecha de manera que sorte el campo vectorial impuesto. Además, se ha situado una fina línea negra entre los puntos de inicio y final, para que se pueda apreciar de manera más sencilla el arco que presenta la trayectoria.

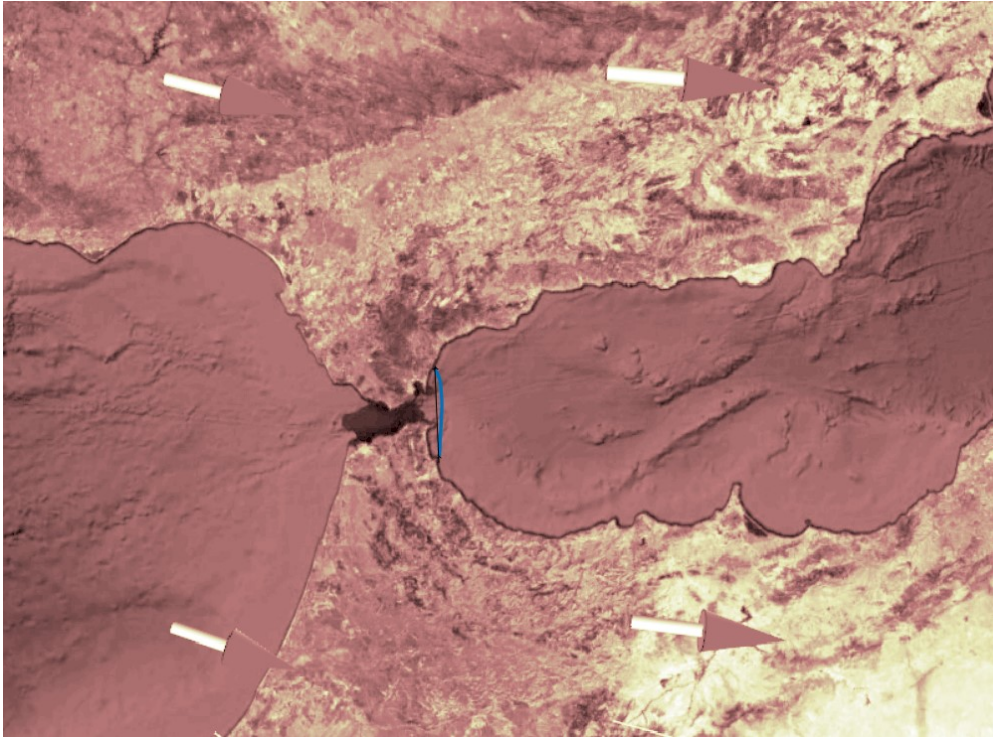


Fig. 5.22. Representación de la trayectoria obtenida en el Estrecho de Gibraltar aplicando el campo vectorial de Google Earth

En la imagen, también se puede ver, como la zona que más arco presenta es la zona central, donde la corriente influye de manera más directa, ya que ambos extremos se encuentran protegidos por tramos de tierra. Esto es debido, a que, en las zonas más estrechas, como es el caso del estrecho de Gibraltar, la velocidad de las corrientes aumenta, haciendo que cuando el espacio se ensanche, la corriente incidirá de una manera más efectiva en dicho centro.

Tras haber analizado la imagen de Google Earth, se va a analizar una imagen obtenida de la web State of the Ocean para esa misma localización, pero con las flechas de corrientes reales.

Cabe destacar que, al estar trabajando en imágenes obtenidas de la web, se utilizará un campo vectorial el cual se ajusta a mano, al contrario que en las imágenes de Google Earth donde se obtiene por el gradiente, por lo que se forzarán trayectorias mucho más pronunciadas para poder apreciar bien los efectos de las corrientes. El módulo escogido, variará dependiendo de la intensidad de las corrientes. En este preciso caso, al estar hablando de una zona de intensas corrientes sobre todo en el tramo del Estrecho, la trayectoria resultante conformará un arco mucho más amplio que el anterior.

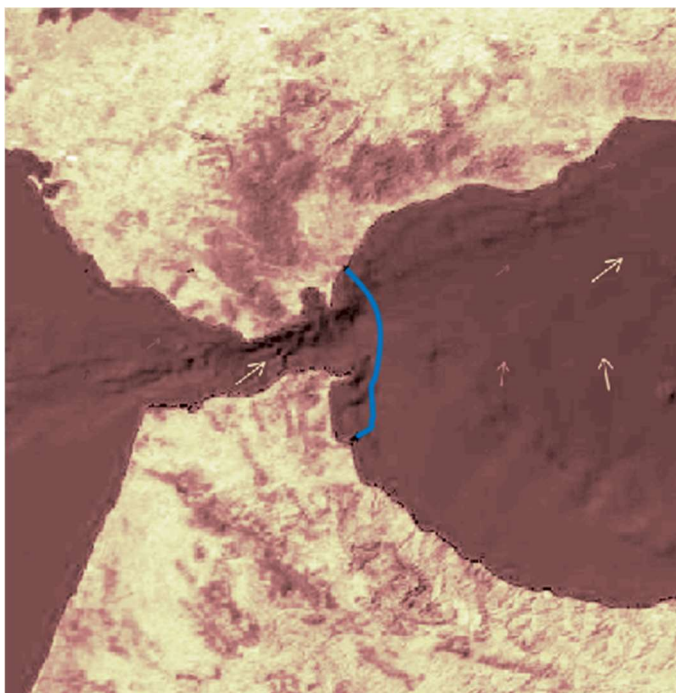


Fig. 5.23. Representación de la trayectoria obtenida en el Estrecho de Gibraltar aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean

En este caso, sí que es posible visualizar de manera muy clara que la trayectoria sufre una considerable curvatura hacia la zona derecha, sobre todo en la parte superior. Como se puede apreciar, las flechas de corriente tienden al noreste en la zona del cauce del Estrecho. Es por ello, por lo que la trayectoria, inicialmente se desvía hacia la derecha y poco a poco va alcanzando un cauce más recto hasta que finalmente llega a su destino. En esta imagen, además, es posible ver de manera más clara lo que supone la barrera natural de tierra sobre la corriente, ya que el fin de la curvatura en la trayectoria coincide con el pico de tierra encontrado en la parte inferior del Estrecho. Esto también es confirmado por las líneas de corriente, las cuales reflejan una trayectoria recta en esta zona, en comparación con la zona abierta que refleja una tendencia hacia la derecha.

5.3.2. Mar Mediterráneo

La zona elegida para realizar la segunda prueba será el sector central del Mar Mediterráneo. Se encuentra rodeada por las penínsulas Itálica y del Peloponeso. Este lugar no llega a confluir con el mar Adriático, donde como se ha expuesto anteriormente, se encuentra la corriente de Bora.

En la simulación obtenida con Google Earth, se puede contemplar que las corrientes de aire tienden hacia el norte, incluso, se puede llegar a apreciar una cierta curvatura de los vectores hacia la izquierda, en la zona elegida para calcular la trayectoria.

En consecuencia, se obtiene la siguiente figura, la cual presenta una trayectoria que comienza con una considerable desviación con sentido noroeste. Esta desviación viene dada por la dirección que presentan los vectores de corrientes, la cual como se ha mencionado antes, tiende ligeramente hacia la izquierda.

Es importante ver que, de no presentar esta tendencia hacia la izquierda, la trayectoria tendría una forma totalmente convexa, describiendo una parábola. Por el contrario, el giro se presenta en el inicio de la trayectoria por ser el punto más a la izquierda de ella, es decir, donde más incide la componente horizontal del vector.

Tras ello, el camino procederá a hacer una trayectoria descendente, hasta el punto final, describiendo un arco en el cual se percibe una cierta inclinación hacia arriba, como consecuencia de la corriente.

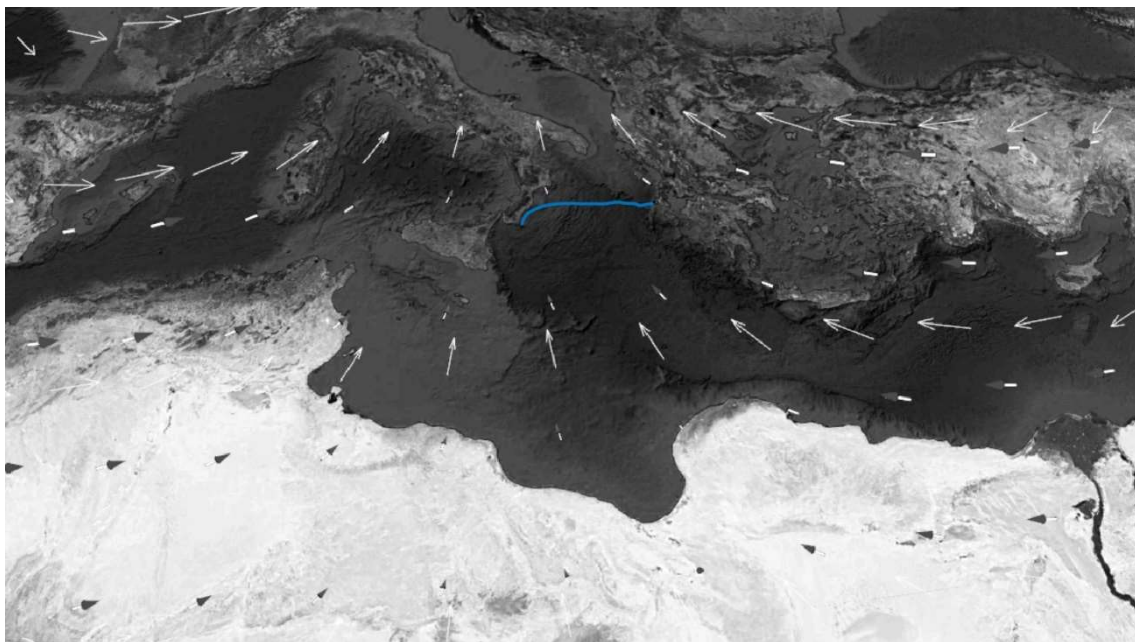


Fig. 5.24. Representación de la trayectoria obtenida en el Mar Mediterráneo aplicando el campo vectorial de Google Earth

El mar Mediterráneo se conoce por ser un mar tranquilo, con pocas corrientes a tener en cuenta salvo en el estrecho de Gibraltar y la zona de las Islas Baleares. Como tal, en la

imagen que obtendremos de la web State of the Ocean, se puede apreciar como hay diminutas líneas de corrientes significativas en la zona que se está estudiando.

Es por ello, por lo que se ha obtenido una trayectoria irregular en consecuencia de la única flecha de corriente que la afecta. Ésta se encuentra en la mitad del espacio entre el punto inicial y final, y tiene dirección sureste.

La ruta comienza describiendo una línea recta hacia el punto final. Tiene esta tendencia, hasta que se encuentra con la ya mencionada línea de corriente, por lo que describirá una curva con la misma orientación que el vector, para poder sortear la corriente venidera.



Fig. 5.25. Representación de la trayectoria obtenida en el Mar Mediterráneo aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean

En el caso de este ejemplo, ambas trayectorias no pueden ser consideradas como iguales, ya que cada una presenta una curvatura hacia uno de los lados, por lo que, a la hora de aplicarla a un caso real, siempre se cogerá la trayectoria obtenida de la imagen del State of the Ocean, ya que son las líneas de corriente marina verdaderas.

5.3.3. Madagascar

El siguiente ejemplo se obtiene de la zona del Océano Índico que separa la isla de Madagascar del continente africano. Esta zona es conocida por ser una zona con corrientes irregulares y fuertes, que causan problemas a los marineros que la transitan. Por ello, se ha considerado un buen sitio para llevar a cabo el análisis. En concreto, se ha realizado la ruta desde el país de Mozambique, hasta la zona de Mahajanga situada en Madagascar.

Primeramente, se ha ejecutado el estudio con las corrientes de aire obtenidas en Google Earth, obteniendo un resultado bastante regular, sabiendo de la alteración que sufren las mareas en la zona.

Las corrientes aéreas, en esta situación, tienen una trayectoria sur, lo que hará que golpee de una manera directa a la trayectoria que se quiera obtener, ya que la dirección de los vectores es completamente perpendicular a la dirección de la trayectoria.

Como es posible contemplar en la figura, la trayectoria dibuja un arco hacia abajo, de manera que describe casi una forma cóncava. Esta forma se acentuaría de no ser por el hecho, de que el campo vectorial, se aplica en el extremo de inicio de la trayectoria, por lo que, en ese lado, como se puede ver, actúa en mayor medida de cómo actúa en el centro del camino.

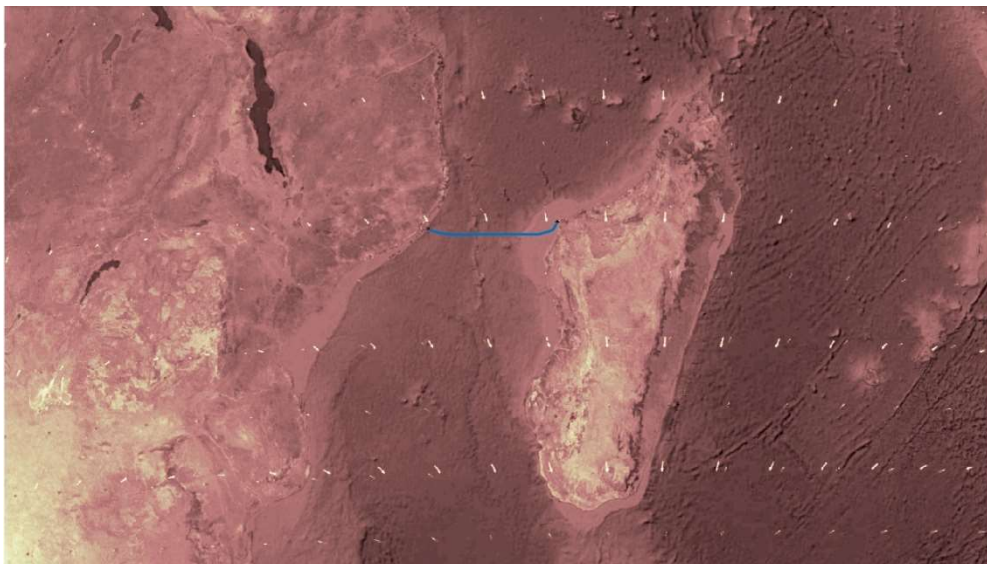


Fig. 5.26. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Madagascar aplicando el campo vectorial de Google Earth

En este ejemplo, la trayectoria se ha obtenido poniendo como punto de inicio la isla de Madagascar, por lo que es ahí donde la curvatura de la trayectoria se acentúa de mayor

manera. En el final de ésta, es decir en Mozambique, es posible ver como la trayectoria sube, pero en menor medida de lo que baja con anterioridad. Esto es consecuencia de la no equidad de alturas entre los puntos inicial y final, ya que la zona de fin se encuentra más al sur que la zona de inicio.

Contrariamente a lo que sucede en esta imagen, las líneas de corrientes reales no describen una forma tan regular como las que describen las aéreas. Es por ello, que la ruta resultante en la imagen obtenida de la web es diferente a la que se ha podido apreciar en la anterior figura.

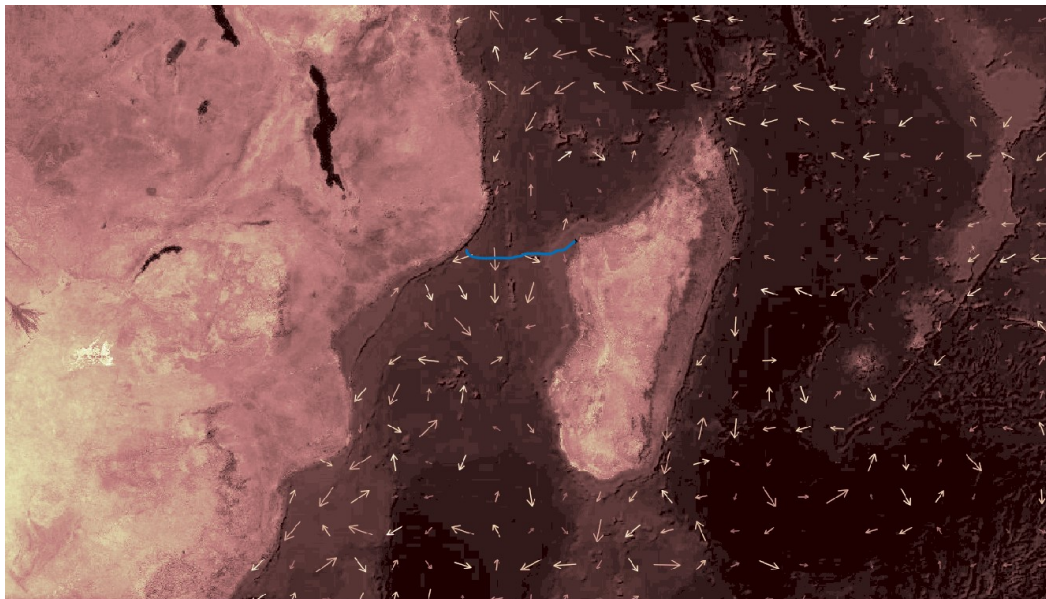


Fig. 5.27. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Madagascar aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean

Las líneas de corriente describen trayectorias completamente aleatorias, variando a lo largo del espacio y señalando en diferentes direcciones.

En el punto donde se ha realizado el análisis, se puede ver como tres vectores de módulo considerable tienden hacia abajo de manera que van describiendo una semicircunferencia. El primero tiende hacia abajo a la izquierda, mientras que el segundo tiene una completa dirección sur, y el tercero presenta una dirección sureste.

Es por ello, por lo que la parte final de la trayectoria presenta una parábola, que coincide con la inclinación descrita por los vectores. Sin embargo, en la parte inicial, la situación es totalmente diferente.

En ella, se ven dos vectores de direcciones opuestas, las cuales hacen que la trayectoria inicial presente una forma irregular, con picos en ambas direcciones que coinciden con la zona de incidencia de cada uno de los vectores contrarios.

En este análisis se puede determinar que las trayectorias obtenidas son bastante parejas a diferencia de las corrientes que las han provocado que son completamente distintas.

La similitud entre ambas trayectorias ha sido causada por la elección de los puntos de inicio y fin, ya que, si la trayectoria hubiese sido obtenida desde otros puntos, probablemente, los resultados hubieran sido bastante diferentes.

5.3.4. Golfo de México

En los dos siguientes ejemplos, se ha decidido variar el patrón que se ha escogido en los 3 primeros. Si se analiza al detalle, se puede ver como las tres primeras trayectorias que se obtienen con las imágenes extraídas de Google Earth, reúnen la misma característica, la trayectoria es casi o totalmente perpendicular a la corriente de aire.

Este dato sería poco significativo de no ser porque la trayectoria no se ve modificada de la misma manera si actúa de forma directa sobre ella, como ocurre con estas 3 anteriores, a si actúa de una manera más lateral, donde la trayectoria se verá menos afectada o modificada de manera diferente.

El primero de estos ejemplos, se sitúa en el Golfo de México. Esta zona en particular es muy especial, ya que en ella se inicia la conocida como Corriente del Golfo que, gracias a su cálida temperatura, consigue suministrar calor suficiente como para equilibrar el clima del norte y del este de Europa. El calor que va perdiendo mientras sube por el océano Atlántico, es pasado al aire de esa misma zona, que posteriormente llegará al continente europeo, creando así un equilibrio térmico que hará que en Europa se pueda disfrutar de un clima menos frío del que debería por su posición en el globo terráqueo. [32]

En concreto, la zona de análisis será el tramo que une la península del Yucatán (punto final) con la isla de Cuba (punto inicial). Este tramo separa el golfo de México del comienzo del Mar Caribe.

En la imagen obtenida con Google Earth, se puede ver como la corriente empieza a dibujar un giro hacia la izquierda en esta zona, quedando el vector en diagonal respecto de la trayectoria calculada.

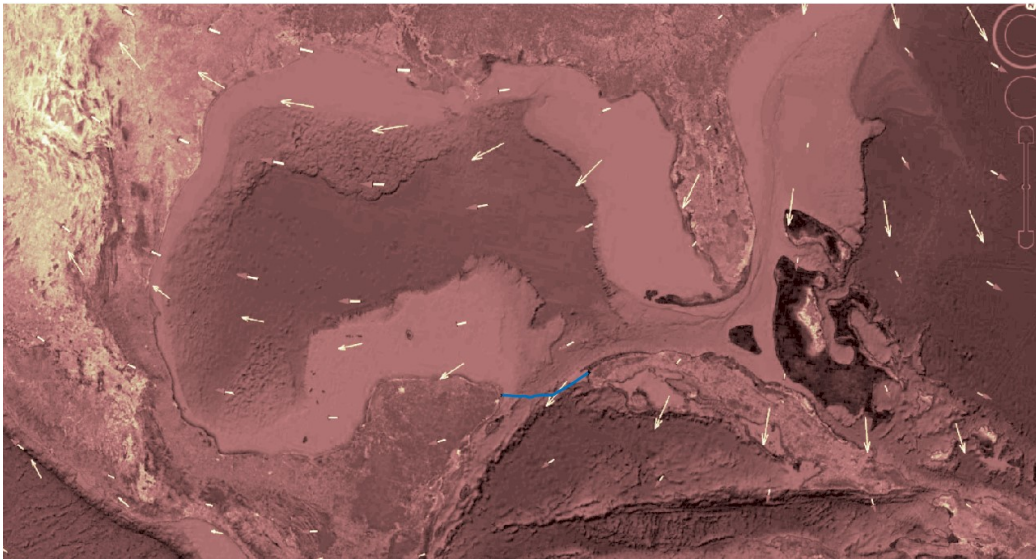


Fig. 5.28. Representación de la trayectoria obtenida en el Golfo de México aplicando el campo vectorial de Google Earth

El vector que incide en medio de la trayectoria será del que obtengamos el gradiente para crear el campo vectorial. Este campo, se caracterizará por tener una dirección suroeste, por lo que hará que la trayectoria se incline hacia abajo.

En este caso, hay un aspecto más importante a tener en cuenta. Al igual que pasaba en el tercer ejemplo, la elección de punto inicial y final es algo muy importante, ya que el campo vectorial se aplica en el punto de inicio. Esto hará, que la trayectoria, en vez de tener una curva orientada hacia abajo a la izquierda, como tendría si el punto inicial fuera en la península del Yucatán, pase a tener una forma de cuenco, como la que presenta en la imagen.

En estos casos, además, al estar atribuyendo estas trayectorias a embarcaciones, la corriente marina no solo tendrá un efecto sobre la trayectoria, sino que también tendrá un efecto sobre la velocidad de la embarcación.

Fijándose en la imagen, se obtiene que el inicio de la ruta, cuando sale de la isla de Cuba, toma una dirección casi paralela al vector de corriente. Esto haría incrementar en mayor medida la velocidad que podría alcanzar la embarcación, sobre todo si se tratara de una embarcación sin motorizar, ya que circularía con la corriente a favor. Aun así,

los USV por cuestiones de comodidad y seguridad, en su mayoría cuentan con motor, así que no se benefician tanto de este factor.

Al igual que con los otros casos, se ha obtenido una imagen de la web State of the Ocean para esta zona de la Tierra. En ella, se pueden apreciar la confluencia de varias corrientes diferentes provocadas por el choque entre el mar Caribe, y el océano Atlántico que fluye por el golfo de México.

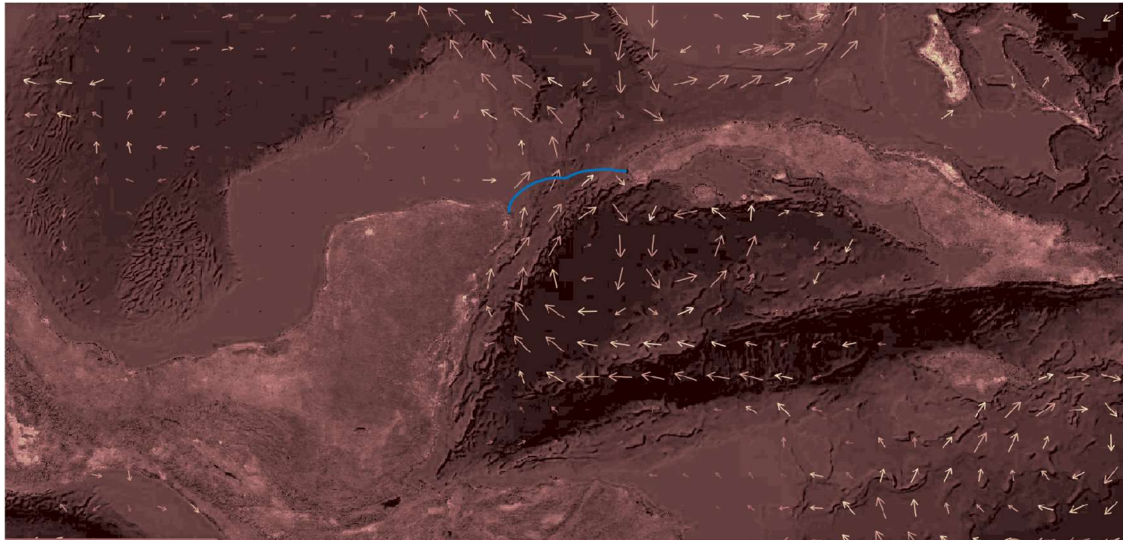


Fig. 5.29. Representación de la trayectoria obtenida en el Golfo de México aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean

En la zona que concierne al estudio, es decir la separación del Yucatán y Cuba, se pueden apreciar líneas de corriente paralelas a la línea de costa en las zonas más próximas a tierra firme. Mientras tanto en la zona central, se ven corrientes con dirección noreste, que se irán tumbando conforme va decreciendo la distancia a la zona de Cuba, donde el vector que sigue la línea de costa tiene un sentido contrario al de la costa mexicana.

La trayectoria presenta dos curvas cóncavas como consecuencia de las corrientes venideras. La corriente paralela a la península del Yucatán afecta en mayor medida a la trayectoria, por estar mucho menos inclinada, siendo un vector con dirección casi norte. Esto hace que la primera de las curvas sea más pronunciada que la segunda. Dicha segunda curva comenzará desde el mínimo que se presenta en la mitad de la trayectoria e irá describiendo una trayectoria similar a la que presentan las flechas de corriente que le afectan. Comenzará subiendo como el vector que se sitúa a la derecha de su inicio, hasta suavemente ir bajando como el vector de sentido contrario que se encuentra en la costa cubana

5.3.5 Escandinavia

El último de los ejemplos tendrá lugar en la zona del norte de Europa, cerca de la península escandinava. La trayectoria en cuestión tratará de unir la zona más meridional de Suecia con la zona más oriental de Alemania. Para ello, se ha decidido añadir una dificultad más al cálculo, de manera que en mitad de la ruta se encontrará la isla de Bornholm, por lo que el programa al ejecutar la trayectoria no solo tendrá que soportar la fuerza del campo vectorial, sino que además tendrá que esquivar la isla rodeándola por alguno de los lados.

En este ejemplo, se acentuará lo antes comentado en relación a las líneas de corriente paralelas a la trayectoria, ya que, si se trazara una línea imaginaria entre los puntos inicial y final, se obtendría una recta totalmente paralela al vector de corriente de aire.

En la imagen obtenida con Google Earth, se ven unas flechas de corriente con dirección norte en la zona donde se realiza el estudio.

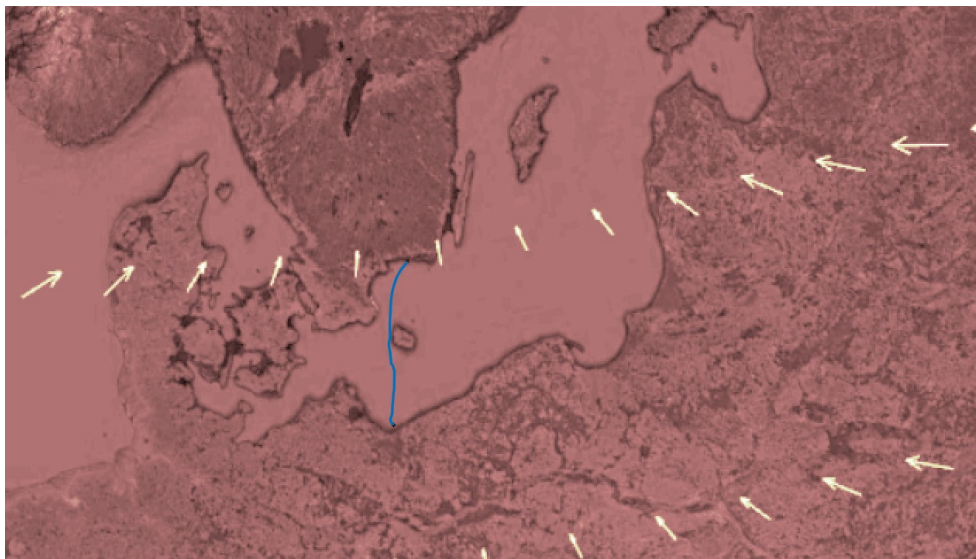


Fig. 5.30. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial de Google Earth

Esto implicaría una casi inexistente alteración en el cálculo de la trayectoria, de no ser por la presencia de la isla, ya que al ser paralela a la trayectoria, no modificaría más que la velocidad de la embarcación por tratarse de viento en contra.

Al tener que curvarse para poder sortear la isla, la trayectoria ya no es paralela a los vectores, por lo que presenta una mayor curvatura hacia la izquierda de la que debería, por la incidencia de las corrientes. Una vez esquivada la isla, se aprecia como la

trayectoria comienza a caminar por la línea recta imaginaria que une los dos puntos, creando una trayectoria recta desde el sur de la isla, hasta el punto final.

Debido a la magnitud de la escala de la imagen, se podría dudar de la distancia que separa el contorno de la isla de la trayectoria obtenida, aunque si se acerca como es el caso de la siguiente imagen, se puede apreciar que la trayectoria esquiva con holgura suficiente la isla, por lo que no pone en peligro la seguridad de la embarcación.

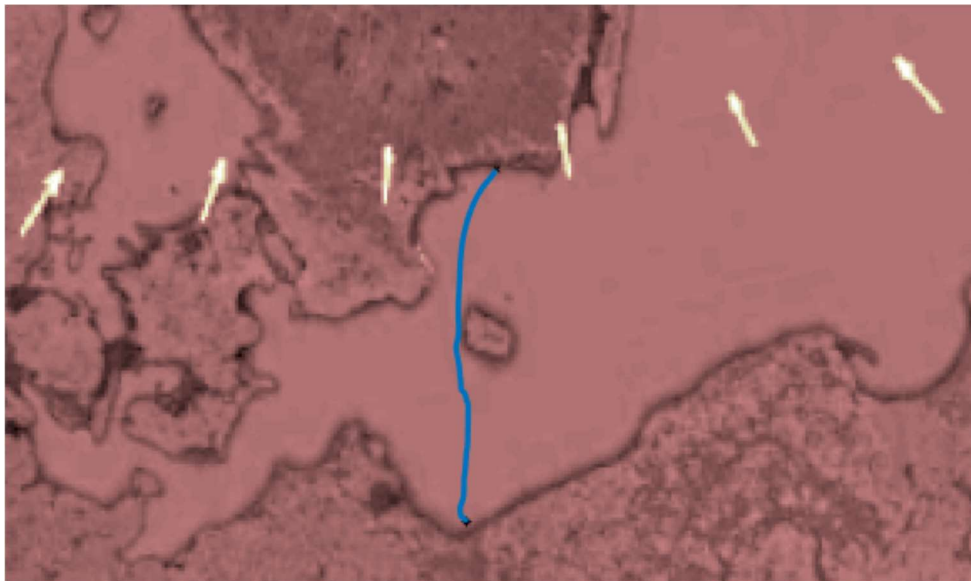


Fig. 5.31. Ampliación de la imagen que muestra la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial de Google Earth

Por último, se analizará este mismo tramo, para el caso real obtenido de la web State of the Ocean.

La masa de agua donde se sitúa el análisis es en el mar Báltico, el cual se junta con el mar del Norte en los pequeños huecos que se forman entre la península de Jutlandia y sus islas. Esto hace del mar Báltico un mar muy tranquilo con poca presencia de corrientes, ya que la península y las islas crean una contención que evita corrientes tan fuertes como las que se daban en el estrecho de Gibraltar. Las corrientes marítimas, al tener que sortear tantos elementos terrestres, evitan la aceleración de las aguas que se produce en los estrechamientos, creando un mar con leves e insignificantes corrientes como se aprecia en la imagen inferior, donde no hay vectores. Es por ello, por lo que la trayectoria sería totalmente recta de no ser por la necesidad de esquivar la isla.

En el ejemplo anterior, debido a la corriente de aire, la trayectoria esquivaba la isla por su parte occidental. En este caso, al no haber ninguna corriente que altere la ruta, se ha

obtenido un camino que bordea la isla de Bornholm por su parte derecha, ya que será el camino más corto por distancia.

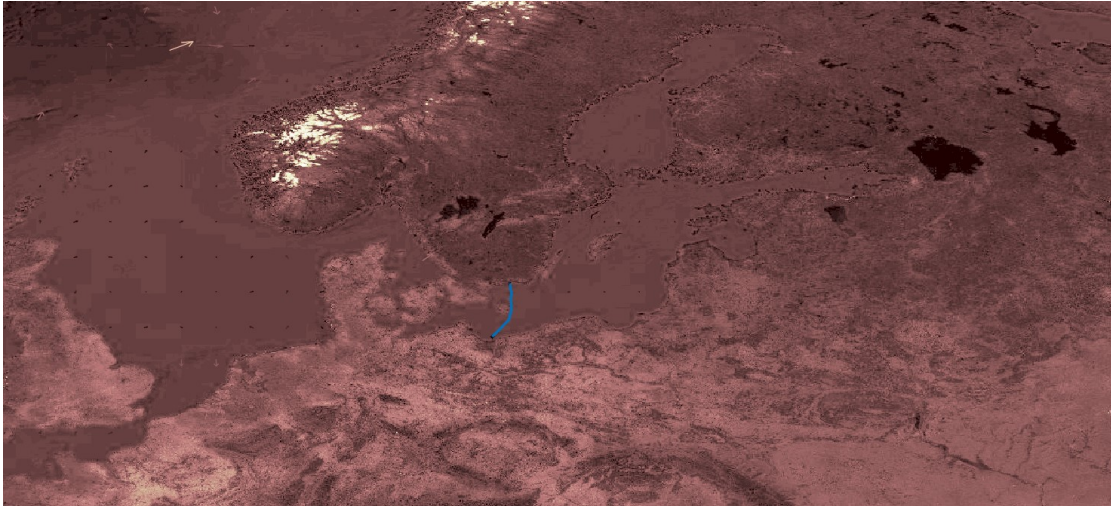


Fig. 5.32. Representación de la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean

Al igual que sucedía con la imagen de Google Earth, se proporciona una vista más cercana de la trayectoria al pasar por el lado de la isla, para asegurar que se esquiva con la distancia necesaria que garantice la seguridad de la embarcación.

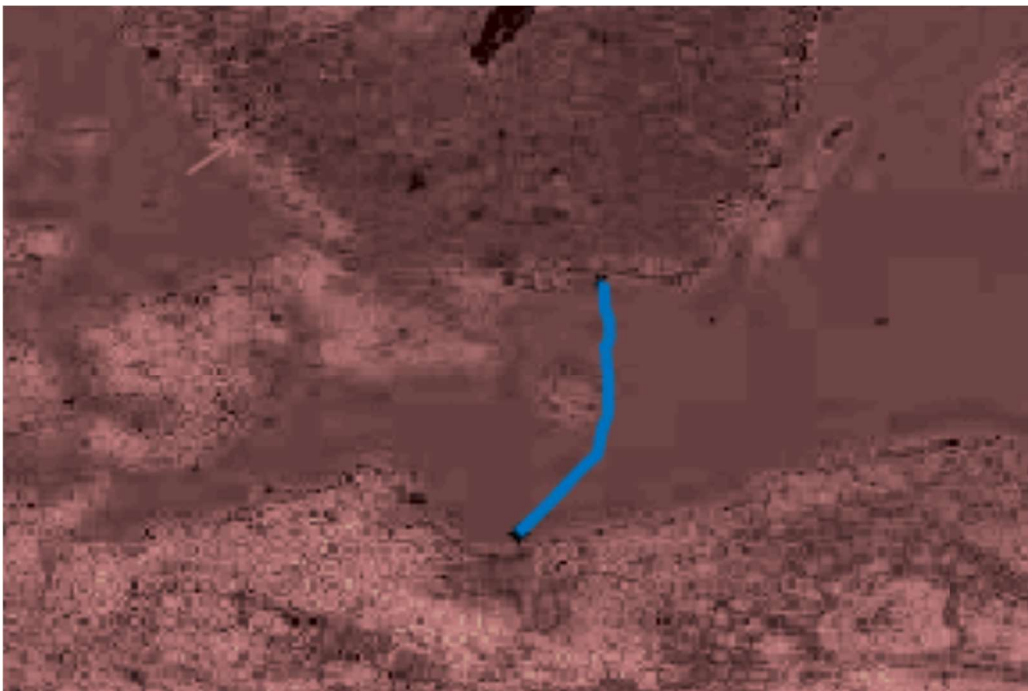


Fig. 5.33. Ampliación de la imagen que muestra la trayectoria obtenida en la zona de Escandinavia aplicando el campo vectorial obtenido en la web State of the Ocean

Con este ejemplo se concluye el análisis del método de Fast Marching sobre casos reales. Los resultados y datos que se han ido viendo y obteniendo a lo largo de este punto, se tratarán en el siguiente apartado que conformará la conclusión del trabajo.

6. CONCLUSIÓN

A lo largo del punto anterior de este trabajo, se han ido proporcionando casos en los que prevalece una máxima; a cada ejemplo que se exponía la dificultad iba aumentando. Prueba de ello es que se empezó el estudio con pruebas en una habitación ficticia sin presencia de campo vectorial, y se concluyó realizando el análisis de una trayectoria entre dos puntos reales de la Tierra con la presencia de un obstáculo entre medias y un campo vectorial en forma de corriente marina.

El método de Fast Marching, no solo ha sido capaz de proporcionar trayectorias óptimas en cuanto a la distancia se refiere, sino que también ha sido capaz de elaborar unos resultados que garantizan la seguridad del objeto que las vaya a recorrer, en este caso se aplicaría a los USV.

Es por ello, por lo que se puede decir con certeza que el método de Fast Marching, es capaz de adaptarse a situaciones de diversas dificultades, ya sean reales o artificiales, respondiendo de una manera válida y considerablemente eficiente. Todo ello, sumado al factor de que su tiempo de ejecución es muy breve, lo hacen un algoritmo ideal para ser utilizado en numerosos estudios dentro de éste y otros campos de investigación.

Además, dentro de este estudio, se han introducido el dibujo de las líneas de corriente como novedad, las cuales se han utilizado de dos maneras diferentes. La primera de ellas recogía los datos del campo vectorial mediante el gradiente del vector de corriente que más influía en la trayectoria. Mientras en la segunda, se calculaba la trayectoria mediante un campo vectorial más heterogéneo, ya que se basaba en corrientes reales, las cuales no eran tan regulares como las del primer caso.

En ambos casos, el algoritmo ha actuado de una manera correcta y eficiente, otorgando trayectorias válidas, por lo que se puede considerar satisfactorio el estudio.

Aun así, se cree que este campo de investigación está en pleno crecimiento y desarrollo, por lo que se puede seguir mejorando y estudiando de manera que se lleguen a resultados más pulidos, incluso llegando a realizar simulaciones en terrenos reales.

Por ello, el siguiente apartado recogerá los puntos que pueden ser reforzados de este trabajo, de forma que puedan ser estudiados por otra persona en un futuro.

7. POSIBLES PUNTOS DE ESTUDIO PARA PRÓXIMOS TRABAJOS

Tras la realización del trabajo y la consecución de resultados satisfactorios, se ha comprobado a lo largo del estudio, que hay factores en los que se pueden realizar mejoras, o bien, se han deducido posibles caminos de estudio que podrían suponer un progreso en lo que a este campo de investigación respecta.

Estos puntos se exponen a continuación:

- **Marco regulador:** Tal y como se ha comentado en el apartado homónimo de este trabajo, el marco regulador de los USV es una incógnita a día de hoy. Es por ello, por lo que, aunque se haya otorgado una estimación de cómo pueden ser tratados los USV actualmente, este campo puede ser trabajado de una forma más concreta, una vez las leyes en favor de estos vehículos vayan apareciendo. Además, esto permitiría una mayor precisión a la hora de elegir los lugares donde realizar las simulaciones, ya que se sabría de antemano, en qué circunstancias y lugares podrían ser circulados los USV, y en cuáles no.
- **Corrientes heterogéneas:** Aunque en este trabajo se hayan trabajado con ambos tipos de corrientes, tanto homogéneas como heterogéneas, a la hora de aproximar a la realidad se ha podido ver que las corrientes homogéneas son raras de encontrar, de manera que se debería enfatizar en mayor manera en las corrientes heterogéneas, obteniendo así trayectorias mucho más realistas.
- **Aplicación a otros tipos de vehículos u otros tipos de superficie:** Tras los diferentes trabajos realizados con este algoritmo se puede asegurar que el método de Fast Marching es un método eficiente de cálculo de trayectorias. Por ello, tras los buenos resultados obtenidos, se podría aplicar a vehículos o superficies más arriesgadas, como podría ser el caso de un robot encargado de la exploración de un planeta o satélite, ya que los terrenos tendrían una morfología diferente o desconocida a las que presentan las superficies terrestres, de manera que presentarían un reto para el algoritmo y para la persona que se encargue del estudio.

- **Experimentación en vehículos reales:** El objetivo de la investigación ha sido ir aproximándose cuánto se pudiera a la realidad. Aun así, la mejor manera de aproximarse a ella sería poder aplicar los resultados obtenidos en los softwares encargados de ese cometido, a vehículos y sistemas de navegación reales, de manera que se pueda analizar su comportamiento ante situaciones totalmente reales, y no ante supuestos como se plantean en estos estudios.

8. ENTORNO SOCIECONÓMICO

Este apartado del trabajo consiste en detallar los costes de los recursos utilizados para la correcta realización del trabajo.

Estos costes se dividirán en costes de herramientas, los cuales equivaldrán a los costes de los elementos físicos del trabajo y los softwares utilizados para ello; y los costes de personal, los cuales sumarán el precio por hora trabajada de las personas que han hecho posible la realización del trabajo, es decir, el tutor del proyecto y el alumno que lo realiza.

TABLA 8.1 COSTES DE PERSONAL

Personal	Coste por hora de trabajo (€/h)	Número de horas de trabajo (h)	Coste total (€)
Tutor académico	50 €	30 horas	1500 €
Alumno	10 €	400 horas	4000 €
Total Coste Personal	5500 €		

TABLA 8.2 COSTES DE RECURSOS

Recurso	Coste del recurso (€/u)	Unidades del recurso (u)	Coste total (€)
Ordenador Portátil	1200 €	1	1200€
Licencia Matlab	500 €	1	500€
Licencia Estudiante Office	0 €	1	0 €
Licencia Google Earth	0 €	1	0€
Total Coste Recursos	1700€		

TABLA 8.3 COSTES TOTALES

Tipo de coste	Cuantía del coste
Coste de Personal	5500 €
Coste de Recursos	1700 €
Total Coste del Trabajo	7200€

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Caccia, "Academia," 2006. [Online]. Available: https://www.academia.edu/2886101/Autonomous_surface_craft_prototypes_and_basic_research_issues.
- [2] J. E. Marley, *Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development*, 2008.
- [3] K. Osborn, «nationalinterest,» National Interest, 27 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://nationalinterest.org/blog/the-buzz/why-the-us-militarys-unmanned-surface-vehicle-weapons-could-17857>.
- [4] O. G. E. Independence, «offgridenergyindependence,» 15 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/15091/solar-and-wind-powered-autonomous-surface-vehicle>.
- [5] C. R. Sonnenburg, *Modeling, Identification, and Control of an Unmanned Surface Vehicle*, Virginia: citeseerx.ist.psu.edu, 2012.
- [6] D. Gouws, «Autonomous unmanned surface vehicle for hydrographic surveys,» EE Publishers, 2014.
- [7] J. Keller, «Hydronalix to build unmanned surface vessel (USV) to monitor safety and for underwater communications,» Military&Aerospace Electronics, Lakehurst, 2016.
- [8] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu y C. Yuan, «Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges,» *Annual Reviews in Control*, nº 41, 2016.
- [9] C. M. Fernández, «La importancia pasada, presente y futura de los USV,» Infodron, Madrid, 2019.
- [10] S. Gonell Sánchez-Seco, «e-archivo.uc3m,» 22 Febrero 2010. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11117#preview>.
- [11] A. Valero-Gomez, J. V. Gomez, S. Garrido y a. L. Moreno, «The Path to Efficiency: Fast Marching Method for Safer, More Efficient Mobile Robot Trajectories,» *IEEE Robotics & Automation Magazine*, nº 20, pp. 111-120, 2013.

- [12] L. A. M. Pascual, «SlideShare,» 2016. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/luisalfredomoctezumapascual/bug1-y-bug2>.
- [13] C. C. Bandera, *Simulación y Comparación de Algoritmos de Evitación de Obstáculos para Múltiples Robots*, Sevilla, 2015.
- [14] R. M. Ángel, J. B. Pérez y D. A. T. Burgos, «ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA UN ROBOT MÓVIL,» de *II IEEE COLOMBIAN WORKSHOP ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, Bogotá, 2006.
- [15] H. E. E. Cuchango, *ALGORITMO PARA PLANEAR TRAYECTORIAS DE ROBOTS MÓVILES, EMPLEANDO CAMPOS POTENCIALES Y ENJAMBRES DE PARTÍCULAS ACTIVAS BROWNIANAS*, Bogotá: Dialnet, 2012.
- [16] A. L. B. Escudero, *Planificación de trayectorias para vehículos submarinos con ROS*, Madrid: e-archivo.uc3m, 2017.
- [17] G. Tutoriales, «gestiondeoperaciones,» 5 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.gestiondeoperaciones.net/inventarios/algoritmo-de-wagner-y-whitin/>.
- [18] A. Patel, "theory.stanford.edu," 22 Febrero 2019. [Online]. Available: <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/AStarComparison.html>.
- [19] N. P. Sancho, *EL RÉGIMEN JURÍDICO DE LOS BUQUES NO TRIPULADOS*, Madrid: repositorio.comillas.edu, 2017.
- [20] Jaime, «dronespain,» Zima Robotics, 2018. [En línea]. Available: <https://dronespain.pro/usv-barco-no-tripulado/>.
- [21] M. I. Sánchez, *Cálculo de trayectorias para vehículos autónomos marinos (USV) utilizando el método Fast Marching Square sometido a campo vectorial*, Madrid, 2016.
- [22] A. B. Juárez, S. Garrido y L. E. Moreno, «Modelización simulada en tiempo real de la evolución de un incendio mediante el Método Fast Marching,» de *XXXVII JORNADAS DE AUTOMATICA*, Madrid, 2016.
- [23] E. G. González, *ÓPTICA GEOMÉTRICA*, Sevilla: Universidad De Sevilla, 2009.
- [24] L. Moreno y S. Garrido, *Fast Marching Method: Application of the Eikonal equation in path planning problems*, Madrid: canal.uned, 2016.

- [25] A. Valero-Gomez, J. V. Gómez, S. Garrido y L. E. Moreno, «Fast Marching Methods in Path Planning,» *IEEE Robotics & Automation Magazine*, nº 20, pp. 111-120, 2013.
- [26] A. B. Juárez, S. Garrido y L. E. Moreno, «Modelización simulada en tiempo real de la evolución de un incendio mediante el Método Fast Marching,» de *XXXVII JORNADAS DE AUTOMATICA*, Madrid, 2016.
- [27] V. G. Pérez, C. A. Monje y C. Balaguer, «PLANIFICACIÓN DE MISIONES DE VEHÍCULOS ÁEREOS NO TRIPULADOS CON FAST MARCHING EN UN ENTORNO 3D,» de *XXXV Jornadas de Automática*, Valencia, 2014.
- [28] V. González, C. A. Monje, L. Moreno y C. Balaguer, «Fast Marching Square Method for UAVs Mission Planning with consideration of Dubins Model Constraints,» *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, nº 17, pp. 164-169, 2016.
- [29] S. Garrido, L. E. Moreno y J. V. Gómez, «Motion Planning Using Fast Marching Squared Method,» de *Motion and Operation Planning of Robotics System: Background and Practical Approaches*, Madrid, Carbone, Gomez-Bravo, 2015.
- [30] J. V. G. González, *Fast Marching Methods in path and motion planning: improvements and high-level applications*, Leganés, 2015.
- [31] KornatTurst, «croatia-charter.yachts,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.croatia-charter.yachts/es/informacion/el-clima-y-los-vientos-en-el-adri%C3%A1tico%20>.
- [32] EcuRed, «EcuRed,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Corriente_del_Golfo.